

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra mechanické technologie**

# **Numerická simulace termického dělení**

**Numerical Simulation of Thermal Cutting**

Student:

Bc. Ondřej Diviš

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2019

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Diviš**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Numerická simulace termického dělení  
Numerical Simulation of Thermal Cutting  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii termického dělení se zaměřením na řezání plamenem a plazmou.
2. Charakterizujte teplotní zdroj pro termické dělení.
3. Proved'te numerickou simulaci na modelovém spoji.
4. Výsledky dosažené numerickou simulací porovnejte s experimentem.
5. Proved'te diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.  
HRIVŇÁK, I. *Teoria zvaritelnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.  
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej Diviš

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Šumperk, Prievidzská 2313/5, 78701



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIVIŠ, O. *Numerická simulace termického dělení: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2019, 83 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá studiem numerických simulací procesů termického dělení. Je provedena charakteristika teplotních zdrojů pro metodu řezání kyslíkem a plasmou. Numerické simulace jsou uskutečněny v programu Simufact Welding 8. Vypočítané teplotní cykly jsou porovnány s naměřenými. Výpočtem jsou predikovány změny strukturního složení materiálu vlivem vneseného tepla. Velikosti a tvar vypočítaných tepelně ovlivněných oblastí jsou porovnány s metalografickou zkouškou.

Klíčová slova: numerické simulace, termické dělení, teplotní cykly, řezání plasmou, řezání kyslíkem

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

DIVIŠ, O. *Numerical Simulation of Thermal Cutting: Master Thesis*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2019, 83 p. Thesis Head: Ochodek, V.

This master thesis addresses the topic of numerical simulations of thermal cutting. Heat sources used in oxygen cutting and plasma cutting are characterized. Numerical simulations are created in Simufact Welding 8. Calculated thermal cycles are compared with the measured thermal cycles. The calculations predict changes in the structural composition of the material due to the heat input. The sizes and shape of the calculated heat affected zones are compared with the metallographic test.

Key words: numerical simulation, thermal cutting, thermal cycles, plasma cutting, oxygen cutting

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU .....</b>	<b>9</b>
1.1 S355.....	9
1.1.1 Chemické složení .....	10
1.1.2 Mechanické vlastnosti .....	10
1.1.3 Tahový diagram oceli S355 .....	12
1.1.4 ARA diagram oceli S355 .....	12
<b>2 TERMICKÉ DĚLENÍ .....</b>	<b>14</b>
2.1 ŘEZÁNÍ PLAMENEM .....	15
2.1.1 Topné plyny .....	17
2.2 ŘEZÁNÍ PLASMOU .....	20
2.2.1 Konvenční plasmové řezání .....	21
2.2.2 Řezání plasmou s ochranným plynem.....	22
2.2.3 Plasmové řezání s vodní clonou.....	23
2.2.4 Plasmové řezání se vstřikováním vody .....	23
2.2.5 Plasmové řezání pod vodou .....	24
2.2.6 Plyny pro plasmové řezání .....	25
<b>3 NUMERICKÉ SIMULACE VE SVAŘOVÁNÍ .....</b>	<b>27</b>
3.1 SIMUFACT WELDING 8 .....	28
3.1.1 Tepelné zdroje .....	31
3.2 VSTUPNÍ PARAMETRY PRO SIMULACI TEPELNÉHO DĚLENÍ .....	33
3.2.1 Volba síťování.....	33
3.2.2 Volba materiálu .....	34
3.2.3 Volba tepelného zdroje .....	34
3.2.4 Volba upnutí.....	37
3.2.5 Nastavení procesních parametrů .....	37
3.3 VÝSLEDKY SIMULACÍ .....	38
3.3.1 Stanovení rozměru tepelně ovlivněné oblasti .....	39
3.3.2 Teplotní cykly .....	40
3.3.3 Obsah strukturních složek .....	41
3.3.4 Porovnání výsledků s experimentem .....	50
3.3.5 Diskuze dosažených výsledků.....	54
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>63</b>
<b>PŘÍLOHA A – VYTVOŘENÍ PROJEKTU V PROGRAMU</b>	
<b>SIMUFACT WELDING 8.0 .....</b>	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHA B – MATERIÁLOVÝ LIST Z KNIHOVNY</b>	
<b>SIMUFACT WELDING 8.0 .....</b>	<b>77</b>
<b>PŘÍLOHA C – MATERIÁLOVÝ LIST S355J2.....</b>	<b>83</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
Ac <sub>1</sub>	[°C]	překrystalizační teplota
Ac <sub>3</sub>	[°C]	překrystalizační teplota
ARA	[-]	anizotermický rozpad austenitu
IRA	[-]	izotermický rozpad austenitu
M	[-]	Gaussův parametr
R <sub>e</sub>	[MPa]	mez kluzu
R <sub>m</sub>	[MPa]	mez pevnosti
T	[°C]	teplota
T <sub>2</sub>	[-]	termočlánek
T <sub>7</sub>	[-]	termočlánek
T <sub>8</sub>	[-]	termočlánek
T <sub>max</sub>	[°C]	maximální teplota
TOO	[-]	tepelně ovlivněná oblast
Z	[%]	poměrné zúžení
a <sub>f</sub>	[mm]	přední délka elipsoidu tepelného zdroje
a <sub>r</sub>	[mm]	zadní délka elipsoidu tepelného zdroje
b	[mm]	šířka elipsoidu tepelného zdroje
d	[mm]	výška elipsoidu tepelného zdroje
t	[s]	čas
t <sub>8/5</sub>	[s]	doba chlazení z 800 °C na 500 °C

## ÚVOD

Moderní doba klade na strojírenskou výrobu vysoké požadavky z hlediska produktivity při zachování optimální funkčnosti a kvality. V důsledku neustálého vývoje je kladen stále větší důraz na konkurenceschopnost výroby. Úspěšné produkci funkčních výrobků předchází jejich konstrukce. Díky nepřetržitému vývoji výpočetní techniky dochází k razantnímu rozvoji simulačních programů, pracujících na principu metody konečných prvků. Pomocí numerických simulací můžeme předcházet neekonomické výrobě, vytvářet ekonomicky přijatelnější řešení při současném zvyšování kvality a snižování výrobních nákladů. Své uplatnění nacházejí numerické simulace v mnoha technologických procesech strojírenské výroby. Umožňují hlubší průnik do zkoumané problematiky, aniž by musely být prováděny experimenty značné časové a finanční náročnosti. Správný návrh procesu je v důsledku velkého množství kombinací vstupních parametrů velmi obtížný. Pomocí virtuálního návrhu lze provádět studie výsledku v závislosti na vlivu předem definovaných parametrů. Mezi procesy, které je možné simulovat, patří obloukové svařování, tepelné zpracování, odporové svařování, pájení, svařování laserovým či elektronovým paprskem.

V úvodní části bude provedena charakteristika použité konstrukční oceli S355. Následně bude realizována studie metod termického dělení se zaměřením na řezání plamenem a plasmou. Bude popsán princip jejich funkce, včetně charakteristiky jejich teplotních zdrojů. Během termického dělení je materiál lokálně nataven, spálen či odpařen. Termické dělení s sebou přináší nevýhodu v podobě změny struktury materiálu vlivem vneseného tepla a vzniku deformací.

Cílem práce je vytvoření modelového spoje za účelem uskutečnění numerických simulací pro řezání plasmou a kyslíkem. Pro tyto potřeby bude využit program Simufact Welding 8. Jako vstupní data pro simulace budou použity výsledky získané v rámci bakalářské práce. Kromě tvorby modelu bude zvláštní pozornost věnována modelovým tepelným zdrojům, jelikož mají z důvodu dosažení výsledku požadovaného charakteru a přesnosti zásadní vliv. Ke kalibraci tepelných zdrojů pro simulace jednotlivých technologií termického dělení budou využity velikosti tepelně ovlivněných oblastí získaných z metalografické zkoušky. Po uskutečnění simulací budou získané výsledky porovnány s experimentálně získanými.

# 1 CHARAKTERISTIKA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU

V rámci uskutečnění experimentálních zkoušek byly na základě studia literatury použity vzorky vyrobené z konstrukční jemnozrnné nelegované oceli S355. Vzorky předem stanovených rozměrů byly zhotoveny z tabule plechu o tloušťce 20 mm. Tato ocel je hojně využívána k výrobě svařovaných konstrukcí, svařovaných či bezešvých trubek, konstrukcí jízdních kol, větrných elektráren, motocyklů či automobilů, jenž jsou namáhány statickým i dynamickým zatížením.

## 1.1 S355

Samotný systém zkráceného označování ocelí se skládá z počátečního písmena, jenž značí použití dané oceli, a tří číslic. Toto číslo vyjadřuje hodnotu minimální meze kluzu v MPa pro nejmenší tloušťku výrobku. Tato problematika je podrobněji rozebrána v normě ČSN EN 10027-1. Písmeno S značí skutečnost, že se jedná o ocel určenou pro ocelové konstrukce všeobecného použití. Číslo 355 poukazuje na hodnotu minimální meze kluzu v MPa pro nejmenší rozsah tloušťky výrobku. Za počátečním písmenem a třemi číslicemi může být uveden přídatný symbol. Ten se skládá buď ze dvou písmen nebo z jednoho písmene a jedné číslice. Označuje jakostní stupeň oceli a vypovídá o její svařitelnosti a zaručených hodnotách nárazové práce. V *Tabulce 1* je patrné přiřazení přídatných symbolů v závislosti na velikosti nárazové práce při jednotlivých zkušebních teplotách. Svařitelnost se zvyšuje od jakostního stupně JR do stupně K2.

*Tabulka 1 – Přídatné symboly v označení oceli [1]*

Nárazová práce	Zkušební teplota [°C]						
	+20	0	-20	-30	-40	-50	-60
<b>27 J</b>	JR	J0	J2	J3	J4	J5	J6
<b>40 J</b>	KR	K0	K2	K3	K4	K5	K6
<b>60 J</b>	LR	L0	L2	L3	L4	L5	L6



### 1.1.1 Chemické složení

Jelikož se jedná o konstrukční nelegovanou ocel, obsahuje pouze malé množství legujících prvků. Nejvíce zastoupeným legujícím prvkem je zde mangan, jenž obecně zvyšuje pevnost bez ztráty plasticity. Ostatní legující prvky jsou zastoupeny pouze v malé míře, jejich maximální přípustné množství v oceli však nesmí být překročeno. Chemické složení jednotlivých jakostních stupňů oceli S355 je blíže specifikováno v *Tabulce 2*.

*Tabulka 2 – Chemické složení [15]*

Jakostní stupeň	Tloušťka [mm]	C	Mn	P	S	Si	Cu	N
<b>S355JR</b>	<40	0,24 max	1,60 max	0,035 max	0,035 max	0,55 max	0,55 max	0,012 max
<b>S355JR</b>	41 – ≤150	0,24 max	1,60 max	0,035 max	0,035 max	0,55 max	0,55 max	0,012 max
<b>S355J0</b>	<40	0,20 max	1,60 max	0,030 max	0,030 max	0,55 max	0,55 max	0,012 max
<b>S355J0</b>	41 – ≤150	0,22 max	1,60 max	0,030 max	0,030 max	0,55 max	0,55 max	0,012 max
<b>S355J2</b>	<40	0,20 max	1,60 max	0,025 max	0,025 max	0,55 max	0,55 max	-
<b>S355J2</b>	41 – ≤150	0,22 max	1,60 max	0,025 max	0,025 max	0,55 max	0,55 max	-
<b>S355K2</b>	<40	0,20 max	1,60 max	0,025 max	0,025 max	0,55 max	0,55 max	-
<b>S355K2</b>	41 – ≤150	0,22 max	1,60 max	0,025 max	0,025 max	0,55 max	0,55 max	-
<b>S355J0WP</b>	<40	0,12 max	1,0 max	0,06 – 0,15	0,035 max	0,75 max	0,25 – 0,55	0,009 max

### 1.1.2 Mechanické vlastnosti

Aby materiál dokázal odolat vnějším vlivům a zatížením, musí být u něj splněny deklarované mechanické vlastnosti. Mezi nejvýznamnější mechanické vlastnosti kovů patří mez pevnosti a mez kluzu nebo také tažnost.

Tabulka 3 – Mez kluzu oceli S355 [15]

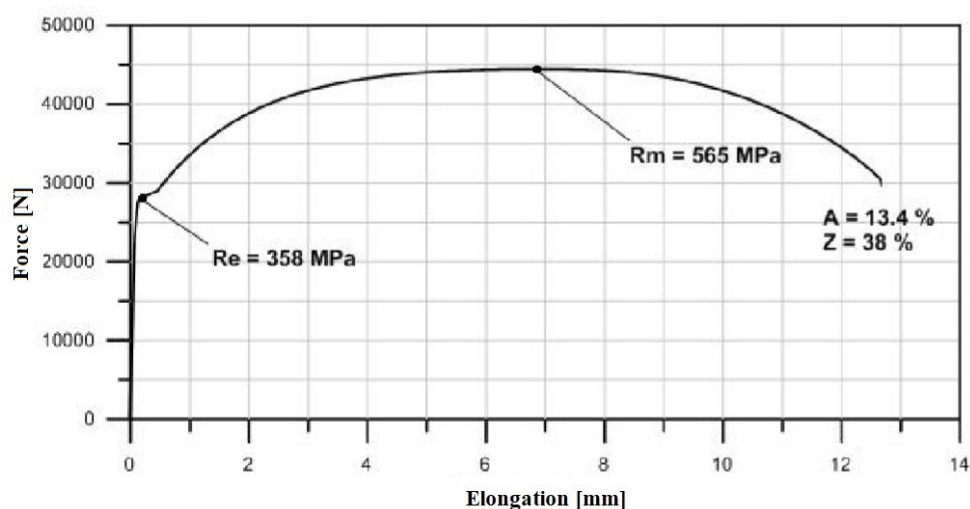
Stupeň jakosti	Mez kluzu [MPa] při nominální tloušťce materiálu [mm]			
	>3 ≤16	>16 ≤40	>80 ≤100	>100 ≤150
<b>S355JR</b>	355 min	345 min	315 min	295 min
<b>S355J0</b>	355 min	345 min	315 min	295 min
<b>S355J2</b>	355 min	345 min	315 min	295 min
<b>S355K2</b>	355 min	345 min	315 min	295 min
<b>S355N</b>	355 min	345 min	315 min	295 min
<b>S355NL</b>	355 min	345 min	315 min	295 min
<b>S355M</b>	355 min	345 min	325 min	295 min
<b>S355ML</b>	355 min	345 min	325 min	295 min
<b>S355J0WP</b>	355 min	345 min	-	-
<b>S355J2WP</b>	355 min	345 min	-	-
<b>S355J0W</b>	355 min	345 min	315 min	295 min

Tabulka 4 – Mez pevnosti oceli S355 [15]

Stupeň jakosti	Mez pevnosti [MPa] při nominální tloušťce materiálu [mm]			
	>3 ≤16	>16 ≤40	>80 ≤100	>100 ≤150
<b>S355JR</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600
<b>S355J0</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600
<b>S355J2</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600
<b>S355K2</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600
<b>S355N</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600
<b>S355NL</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600
<b>S355M</b>	470 – 630	470 – 630	440 – 600	430 – 590
<b>S355ML</b>	470 – 630	470 – 630	440 – 600	430 – 590
<b>S355J0WP</b>	470 – 630	470 – 630	-	-
<b>S355J2WP</b>	470 – 630	470 – 630	-	-
<b>S355J0W</b>	470 – 630	470 – 630	470 – 630	450 – 600

### 1.1.3 Tahový diagram oceli S355

Tahová zkouška byla uskutečněna v laboratoři materiálové pevnosti institutu mechaniky a strojírenství Technické univerzity Czestochowa autory Wiesława Piekarska a Dorota Goszczyńska-Króliszewska. Ze získaného tahového diagramu (*Graf 1*) je patrné, že experimentálně získané hodnoty meze kluzu a meze pevnosti korespondují s hodnotami uvedenými výše.



*Graf 1 – Tahový diagram oceli S355 [9]*

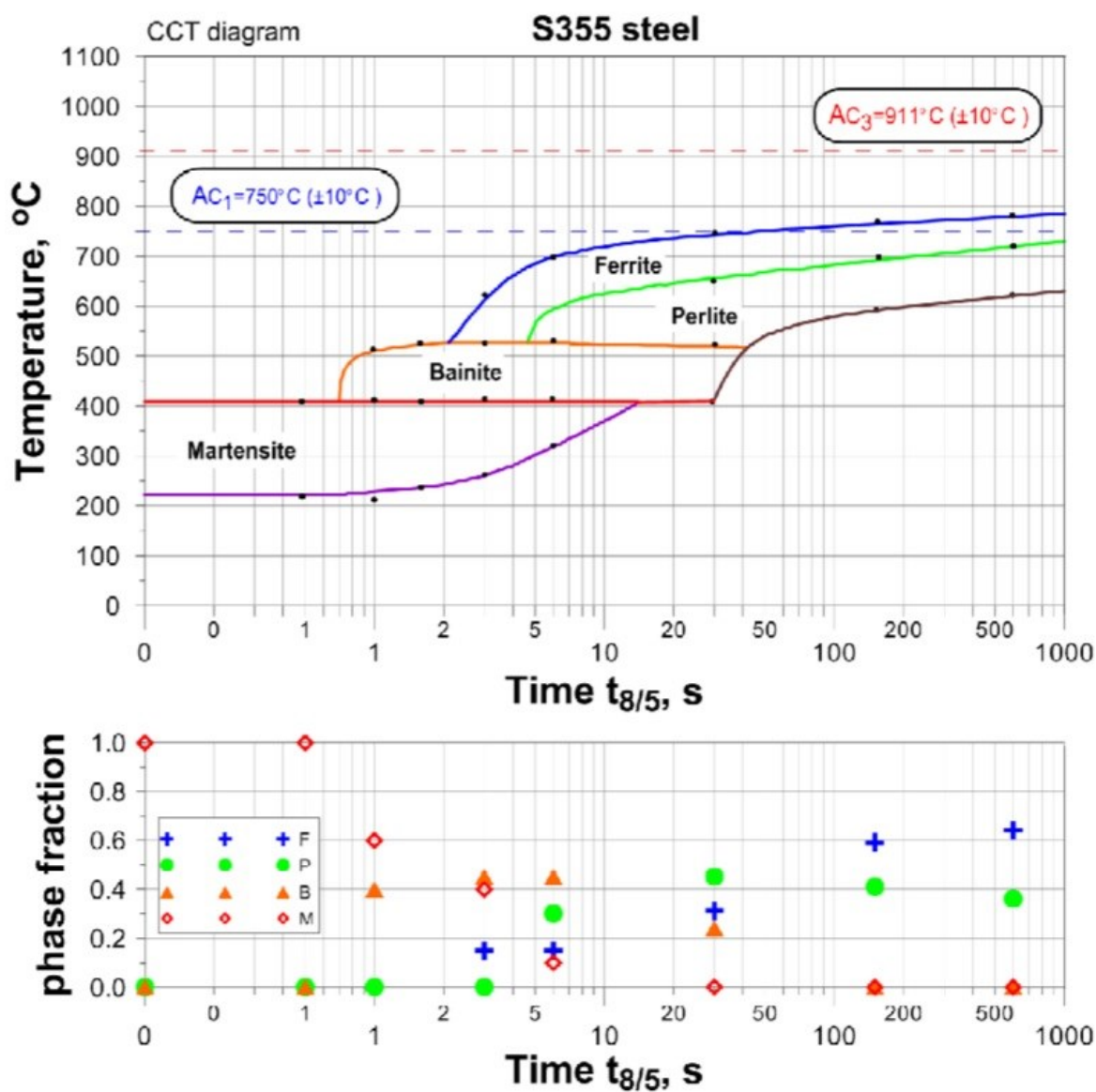
*force – síla, elongation – prodloužení*

### 1.1.4 ARA diagram oceli S355

Tento diagram popisuje anizotermický rozpad austenitu v průběhu postupného ochlazování materiálu danou ochlazovací rychlostí na teplotu okolního prostředí. Uplatnění anizotermického rozpadu roste s velikostí tloušťky výrobku. ARA diagram vyobrazený v *Grafu 2* byl experimentálně získán pomocí provedení dilatometrických testů. Dále byly získány objemy jednotlivých strukturních složek, které se tvoří vlivem ochlazování austenitické fáze. Výzkum byl uskutečněn pro ocel S355 s chemickým složením uvedeným v *Tabulce 5*.

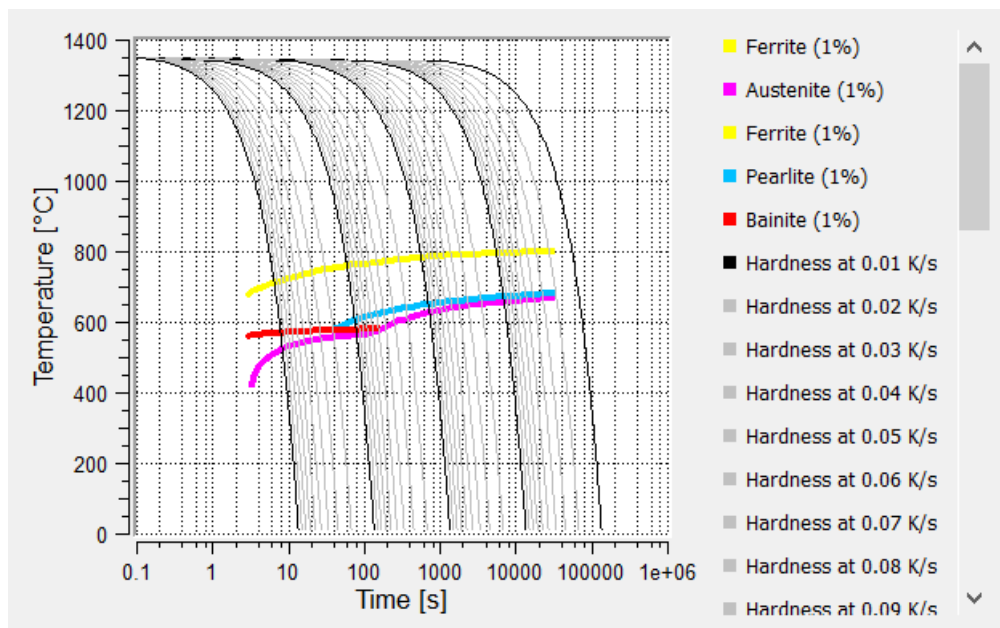
Tabulka 5 – Chemické složení konkrétní oceli S355 [5]

C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni
0,19	1,05	0,20	0,028	0,02	0,006	0,08	0,11



Graf 2 – ARA diagram a fázové složení oceli S355 [5]

Následující ARA diagram je obsahem knihovny materiálu softwaru Simufact Welding 8, v němž byly prováděny samotné simulace procesu v rámci experimentální části této práce.

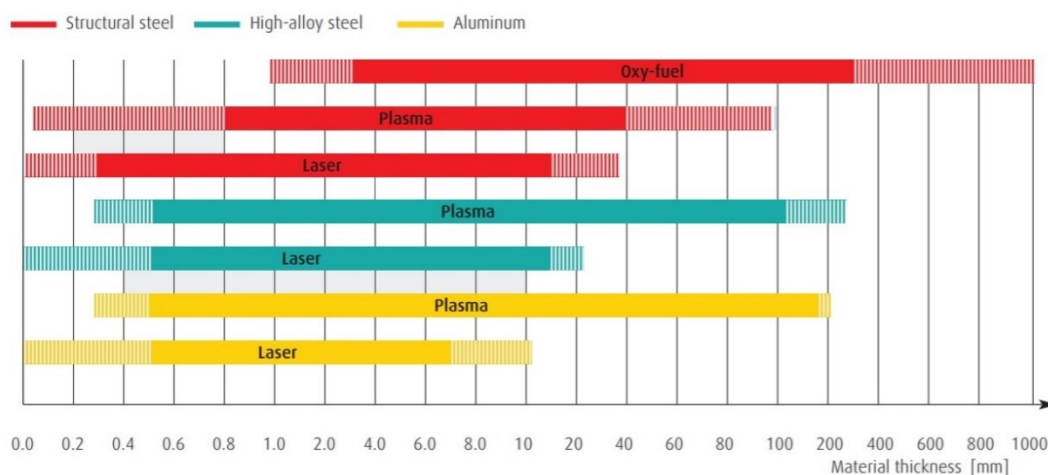


Graf 3 – ARA diagram oceli S355 z knihovny materiálu Simufact Welding 8

## 2 TERMICKÉ DĚLENÍ

Ve výrobním procesu strojírenské výroby nachází dělení materiálů významné uplatnění. Řezání kovu je v současnosti charakterizováno vyššími nároky na kvalitu a zároveň neustálým tlakem na snížení finančních nákladů. Řezné hrany by neměly vykazovat potřebu dalšího zpracování a očekává se jejich maximální možná rozměrová přesnost. Z důvodu uspokojování stále se zvyšujících požadavků ztrácí tradiční metody dělení materiálu na atraktivitě. Při termickém dělení je materiál lokálně nataven, spálen, či odpařen. Tyto jevy mohou probíhat také kombinovaně. Potřebná energie je procesu poskytována různými druhy tepelných zdrojů. Metodu termického dělení je možno aplikovat na většinu používaných konstrukčních materiálů. Na základě odlišností nacházejí jednotlivé metody termického dělení uplatnění dle požadované kvality řezu, druhu děleného materiálu a jeho tloušťky, či finanční hospodárnosti.





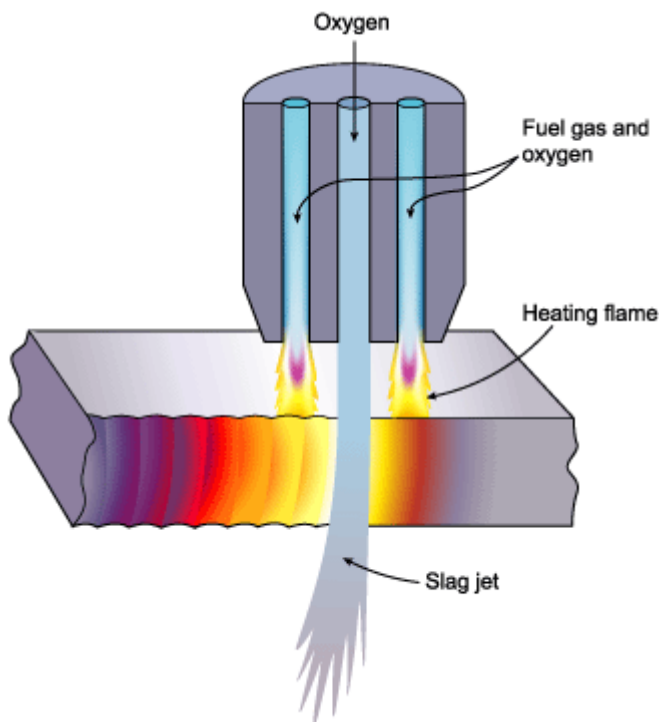
Obrázek 1 – Oblast použití jednotlivých metod termického dělení [1]

*structural steel* – konstrukční oceli, *high-alloy steel* – vysoce legované oceli,  
*aluminum* – hliník, *oxy-fuel* – řezání kyslíkem

## 2.1 Řezání plamenem

Jedná se o technologii, při níž je v prvotní fázi nutné ohřát kov na jeho zápalnou teplotu. Jedná se o teplotu, při které dochází k intenzivní reakci kovu s kyslíkem. Toho je docíleno za pomoci směsi kyslíku a topného plynu, jenž proudí z postranních otvorů hořáku a ohřívá vrchní část kovu. Kov ohřátý na zápalnou teplotu je následně vypálen proudem čistého řezacího kyslíku, vycházejícího z trysky umístěné uprostřed hořáku. Okolní materiál je vlivem této vysoce exotermické reakce zahříván, což přispívá k průniku po celé tloušťce materiálu. Vlivem spalování kovu dochází ke vzniku strusky či oxidaci kovu. Struska je z řezné spáry odstraňována proudem kyslíku o vysokém tlaku, vlivem čehož dochází k průniku skrze materiál.

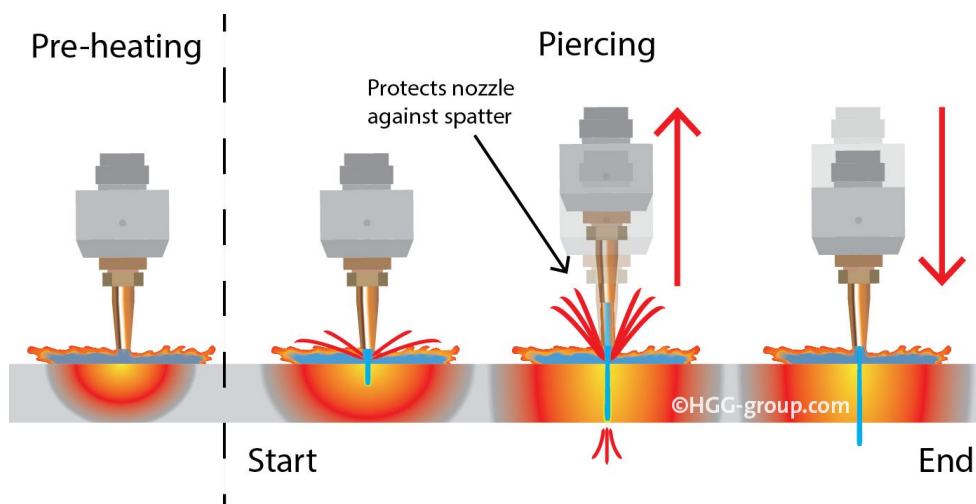
Během počátečního průniku materiálem předehřátým na zápalnou teplotu dochází k rozstříku, protože řezný kyslík odfoukne strusku směrem vzhůru. Tento jev může způsobit znečištění trysky hořáku a negativně tak ovlivnit průtok plynu a proces řezání. Z důvodu ochrany špičky hořáku před rozstříkem strusky v průběhu pronikání materiálem se řezací hořák pohybuje směrem nahoru. Po průniku skrze celou tloušťku řezaného materiálu je hořák přesunut opět do správné vzdálenosti, jak je patrné na *Obrázku 3*.



Obrázek 2 – Schématické znázornění řezání kyslíkem [3]

*oxygen – kyslík, fuel gas and oxygen – topný plyn a kyslík, heating flame – topný plamen, slag jet – proud strusky*

Pokud by teplota tavení oceli nebyla výrazně nižší než teplota zápalná, nebylo by možné ocel řezat. Docházelo by k tavení kovu a nikoli k jeho intenzivnímu hoření. Vzniklý řez by byl velmi nekvalitní. Aby mohly být oxidy odstraněny z místa řezu proudem řezného kyslíku a nezabraňovaly dalšímu řezání, jejich teplota tavení musí být nižší než teplota tavení základního materiálu. Struska musí být dostatečně tekutá, z důvodu možnosti vyfouknutí z řezné spáry. Dostatečně velká hodnota kinetické energie proudu řezného kyslíku zajišťuje odstranění strusky a oxidů. V průběhu řezání musí být udržena minimálně zápalná teplota, vznikající reakce mezi kovem a kyslíkem musí být dostatečně exotermická. Pokud by v průběhu reakce mezi kovem a kyslíkem vznikalo nadměrné množství plynných produktů, docházelo by k ředění řezného kyslíku. Z hlediska rychlosti řezání je velmi významná čistota řezného kyslíku. Běžná čistota řezného kyslíku je 99,3 – 99,7 % a s každým snížením o 0,5 % klesá řezná rychlost přibližně o 10 % [4].



Obrázek 3 – Ochrana trysky hořáku v průběhu průniku materiálem [11]

*pre-heating – přehřev, start – začátek, end – konec, piercing – průnik, protects nozzle against spatter – ochrana trysky během průniku*

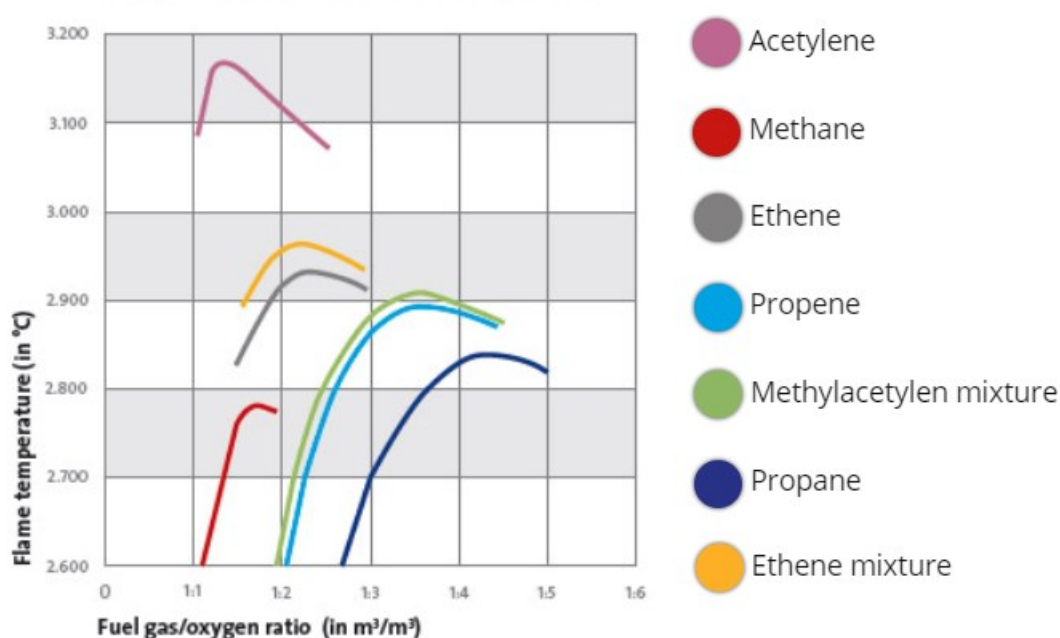
### 2.1.1 Topné plyny

Pro řezání kyslíkem jsou topné plyny nepostradatelné, jelikož plní funkci ohřevu materiálu na jeho zápalnou teplotu. Poskytují oceli energii potřebnou k udržení řezné reakce, chrání proud řezného kyslíku před okolní atmosférou. Plamen odstraňuje z povrchu oceli rez, zbytky barev či jiné nečistoty, které by mohly zpomalit řezný proces v postupu nebo mu zcela zabránit. Plamen s intenzitou dostatečnou k rychlému ohřevu materiálu na zápalnou teplotu je schopen udržet pokračující řezný účinek pouze při vysoké rychlosti posuvu. Řez však nemusí disponovat zrovna optimální kvalitou. Při značně nižší intenzitě přehřevu materiálu na zápalnou teplotu je docíleno řezů dosahujících výrazně vyšší kvality, než je tomu u přehřevu rychlém. Většina velkých řezacích strojů je vybavena systémem, jenž dokáže měnit průtok plynu v průběhu řezného procesu. Ze začátku procesu je plamen za účelem rychlého přehřevu vysoce intenzivní, zatímco v průběhu řezu dochází ke snížení intenzity. Díky tomu dochází k úspoře palivového plynu i kyslíku a je dosaženo řezného povrchu vyšší kvality.

Mezi nejdůležitější parametry, podle nichž je volen topný plyn pro technologie řezání kyslíkem, patří řezná rychlost, rychlost ohřevu na zápalnou teplotu a schopnost propálení. Z hlediska poskytovaných vlastností, rychlosti řezání a hospodárnosti nachází nejširší oblast použití acetylen. Poskytuje ze všech ostatních používaných plynů nejvyšší výkon

primárního plamene, plamen dosahuje nejvyšší teploty a rychlosti spalování. Tato skutečnost je viditelná na *Obrázku 7* a *Obrázku 8*. Nevýhodou nebo dokonce nebezpečím vysoké rychlosti spalování může být riziko zpětného šlehnutí do hořáku. Použití acetyleny přináší v porovnání s ostatními topnými plyny nejnižší hodnoty spotřeby kyslíku. Propan na rozdíl od acetyleny hoří plamenem s nižší koncentrací tepla. Teplo je podél řezu rovnoměrněji rozloženo, což může být výhodné při řezání materiálů větších tloušťek. Mezi další topné plyny, které jsou pro tuto technologii používány, patří propylen, etylen, metan, či plyné směsi.

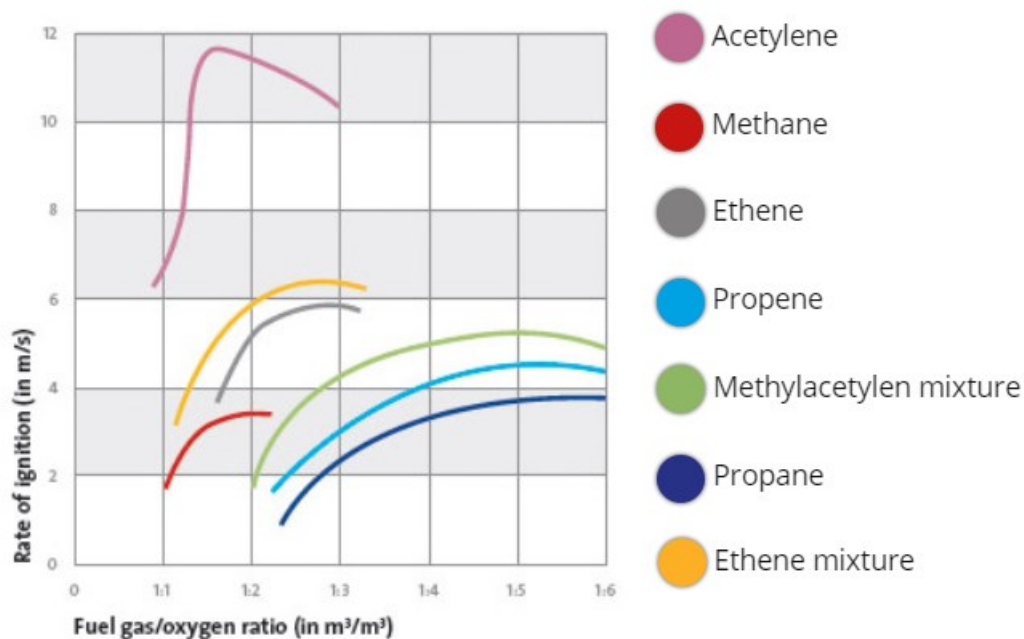
Flame temperature fuel gas/ oxygen



*Obrázek 4 – Teplota plamene topný plyn/ kyslík [12]*

*flame temperature – teplota plamene, fuel gas/oxygen ratio – poměr topného plynu ke kyslíku*

## Rate of flame ignition fuel gas/oxygen



Obrázek 5 – Rychlost hoření plamene topný plyn/ kyslík [12]

*rate of ignition– rychlost hoření, fuel gas/oxygen ratio – poměr topného plynu ke kyslíku*

Spalováním acetyleny s kyslíkem vzniká krátký plamen vysoké teploty s jasným vnitřním kuželem. Nejvyšší teploty je dosaženo na konci vnitřního kužele. Spalování je dokončeno v dlouhém vnějším obalu plamene. Snadno viditelný rozdíl mezi oběma plameny usnadňuje nastavení poměru kyslíku pro dosažení požadovaných vlastností plamene. V závislosti na tomto poměru lze klasifikovat následujících typy plamene.

Pokud je množství kyslíku nedostatečné pro úplné spalování, vzniká takzvaný redukční plamen. Teplota na špičce vnitřního kužele plamene je přibližně 2 930 °C až 3 040 °C [13]. Redukční plamen se občasné používá k hrubému řezání litiny.

Tento plamen má poměr kyslíku k acetyleny 1 – 1,1: 1. Teplota na špičce vnitřního kužele je pravděpodobně vyšší než 3 040 °C [13]. Tento plamen se obecně používá pro ruční řezání.



Plamen, v němž je množství kyslíku přebytné, se nazývá oxidační a jeho teplota dosahuje až 3 315 °C [13]. Používá se za účelem krátké doby předehřevu a pro řezání materiálů velké tloušťky.

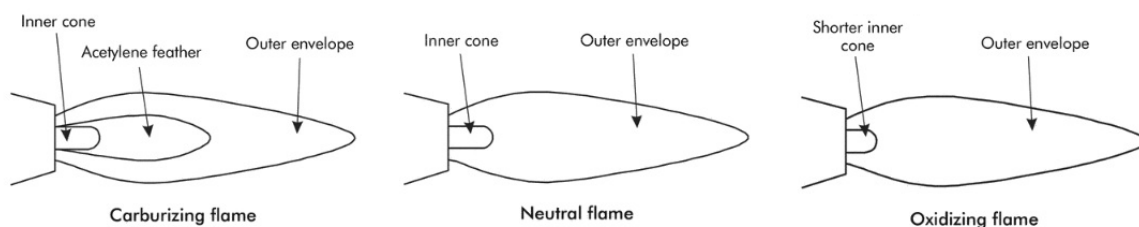


Figure 29-3. Types of oxyacetylene flames.

Obrázek 6 – Typy kyslíko-acetylenového plamene [14]

*carburizing flame – redukční plamen, neutral flame – neutrální plamen, oxidizing flame – oxidační plamen, inner cone – vnitřní kužel, acetylene feather acetylenový závoj, outer envelope – vnější plamen, shorter inner cone – kratší vnitřní kužel*

## 2.2 Řezání plasmou

Plasmový plyn ionizovaný elektrickým obloukem prochází úzkou tryskou. Díky vysoké hustotě energie a vysoké teplotě plasma expanduje a pohybuje se směrem k pracovní ploše až trojnásobnou rychlostí zvuku [10]. Anoda je tvořena řezaným materiálem nebo tělesem hořáku, zatímco katoda netavící se wolframovou elektrodou. Pro zahájení řezného procesu je nejprve působením vysokého napětí zapálen pilotní oblouk mezi katodou a tryskou. Pilotní oblouk je energeticky slabší a ionizací částečně připraví dráhu mezi hořákem a pracovní plochou. Když se pilotní oblouk dotkne obrobku, dochází automaticky ke zvýšení výkonu hlavního řezacího oblouku. Během této technologie je dosaženo teplot až okolo 27 000 °C [6]. Materiál je vlivem velmi vysoké teploty rychle nataven a díky vysoké rychlosti plasmového paprsku následně odstraněn z řezné spáry. Natavený kov je vlivem vysoké teploty také částečně odpařen. Výhodou této technologie je snížení deformací materiálu a velikosti tepelně ovlivněné oblasti, díky velké rychlosti ohřevu materiálu. Řezání plasmou může být použito pro řezání všech elektricky vodivých materiálů, jako jsou konstrukční oceli, vysoce legované oceli, ale i hliníku či mědi. V závislosti na použité technologii plasmového řezání a kapacitě řezacího stroje je možné řezat plech od tloušťky 0,5 mm až po tloušťku 180 mm [10].

Největší výhody poskytuje technologie řezání plasmou při řezání plechů větší tloušťky z vysoce legované oceli a hliníku. Používá se také pro řezání běžné konstrukční oceli do tloušťky cca 40 mm. Způsobuje vznik velmi malých deformací, zejména u tenkých výrobků. Díky nízkému tepelnému příkonu je tato technologie vhodná také pro řezání vysoce pevných jemnozrnných ocelí. Ve srovnání s řezáním kyslíkem lze dosáhnout přibližně pětikrát až šestkrát vyšší řezné rychlosti, což je z hlediska efektivity a hospodárnosti procesu dělení materiálu velmi důležité [10]. Prostřednictvím použití různých druhů dvourozměrných či trojrozměrných řídicích systémů může být proces řezání plasmou snadno automatizován. Plasmové hořáky mohou být chlazeny buď vodou nebo plynem. Proces řezání plasmou může probíhat také pod vodou.

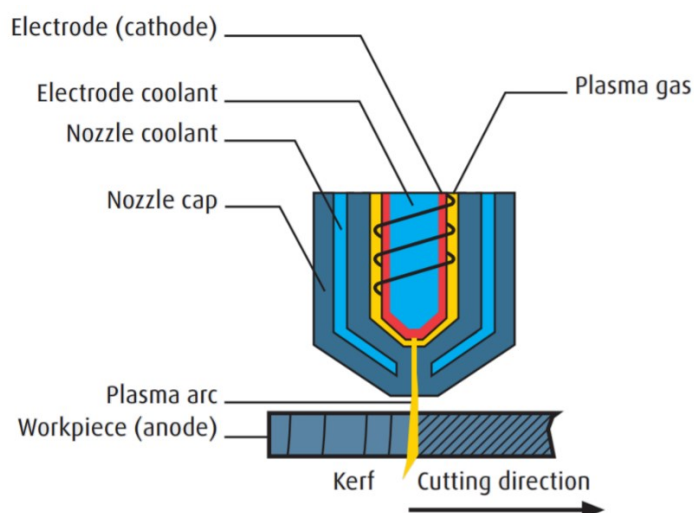
*Tabulka 6 – Doporučené kombinace plynů a jejich vliv na kvalitu řezu [10]*

<b>Materiál/tloušťka</b>	<b>Plasmový plyn</b>	<b>Sekundární plyn</b>	<b>Komentář</b>
<b>Konstrukční ocel 0,5 – 8 mm</b>	Kyslík	Kyslík; kyslík/dusík; dusík	Tolerance pravoúhlosti podobná jako u laseru, hladké řezné hrany bez otřepů
<b>Konstrukční ocel 4,0 – 50 mm</b>	Kyslík	Kyslík/dusík; vzduch; dusík	Do 25 mm pravoúhlost v toleranci jako u laseru, hladké plochy řezu, do otřepů do 20 mm
<b>Vysokolegovaná ocel 1 – 6 mm</b>	Dusík	Dusík; dusík/vodík	Nízká tolerance pravoúhlosti, čisté řezné hrany bez otřepů
<b>Vysokolegovaná ocel 5 – 45 mm</b>	Argon/vodík/dusík	Dusík; dusík/vodík	Nízká tolerance pravoúhlosti, čisté řezy, do 20 mm bez otřepů
<b>Hliník 1 – 6 mm</b>	Vzduch	Dusík; dusík/vodík	Téměř pravoúhlé řezy bez otřepů, drsný a zrnitý povrch řezu
<b>Hliník 5 – 40 mm</b>	Argon/vodík/dusík	Dusík; dusík/vodík	Téměř pravoúhlé řezy, drsný a zrnitý povrch řezu bez otřepů do 20 mm

### 2.2.1 Konvenční plasmové řezání

U standardních plasmových řezacích strojů je hořák relativně jednoduché konstrukce určen pouze pro jeden plyn. Jako plasmový plyn je obvykle použit dusík, kyslík nebo směs argonu s vodíkem [10]. Velikost paprsku je omezena pouze průměrem trysky.

Pro tuto metodu je typická zkosená řezná hrana. Plasmový plyn se obvykle pohybuje tangenciálně okolo elektrody. V závislosti na řezné rychlosti je hořák chlazen buď vodou nebo vzduchem. Konvenční plasmové řezací systémy jsou určeny pro řezání do tloušťky přibližně 160 mm [10]. Tato technologie je hojně využívána zejména v kusové výrobě. Hořák může být veden ručně nebo jednoduchým strojkem.



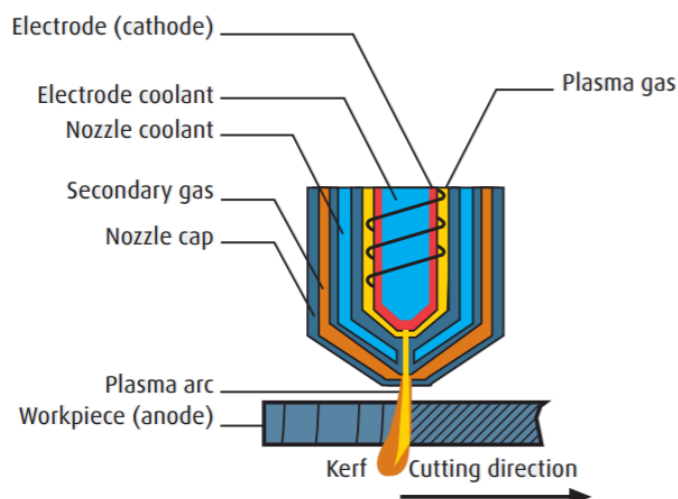
Obrázek 7 – Konvenční plasmové řezání [10]

*electrode (cathode) – elektroda (katoda), electrode coolant – chlazení elektrody,  
nozzle coolant – chlazení trysky, nozzle cap – obal trysky, plasma gas – plasmový plyn,  
plasma arc – plasmový paprsek, workpiece (anode) – řezaný materiál (anoda),  
kerf – řezná spára, cutting direction – směr řezání*

### 2.2.2 Řezání plasmou s ochranným plynem

Přivádění sekundárního, též vířivého plynu, plasmový paprsek stabilizuje a chrání před okolním prostředím. Plasmový paprsek je více usměrněný, dochází k lepšímu vyfukování roztaveného materiálu, ke zlepšení kvality řezu a zvýšení řezné rychlosti. Umístění trysky vně ochranného krytu, jenž zabraňuje kontaktu s řezaným materiálem a snižuje vznik dvojitého oblouku, prodlužuje životnost spotřebních dílů hořáku. Řezací stroje využívající tuto technologii jsou v současné době k dispozici pro řezání plechů do tloušťky 75 mm [10]. Jako plasmový plyn se pro řezání běžných ocelí používá vysoce

čistý kyslík, pro řezání vysokolegovaných ocelí, hliníku či mědi dusík nebo argon. Tato technologie je využívána u portálových CNC strojů.



Obrázek 8 – Řezání plasmou s ochranným plynem [10]

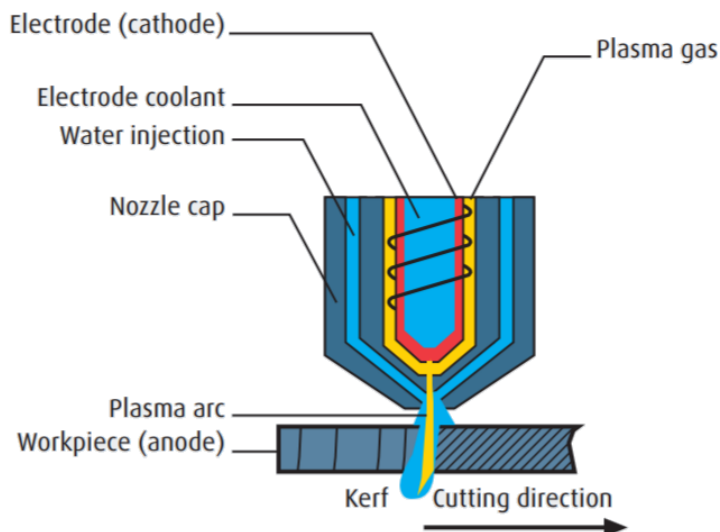
*secondary gas – ochranný plyn, electrode (cathode) – elektroda (katoda), electrode coolant – chlazení elektrody, nozzle coolant – chlazení trysky, nozzle cap – obal trysky, plasma gas – plasmový plyn, plasma arc – plasmový paprsek, workpiece (anode) – řezaný materiál (anoda), kerf – řezná spára, cutting direction – směr řezání*

### 2.2.3 Plasmové řezání s vodní clonou

Jako sekundární médium může za účelem ochrany plasmového paprsku být mimo plynu využita také voda. Tato technologie je výhodná pro řezání hliníku a vysokolegované oceli do tloušťky 50 mm [10]. Vodní clona ochlazuje řezaný materiál, redukuje jeho deformaci, zabraňuje úniku plynů a záření.

### 2.2.4 Plasmové řezání se vstřikováním vody

Při této technologii je ve spodní části hořáku do plasmového paprsku vstřikována voda, která ho zužuje. Díky tomu je dosaženo přesnějších a kvalitnějších řezů. Pouze malá část vstřikované vody se odpaří, zbytek chladí trysku hořáku a řezaný materiál.



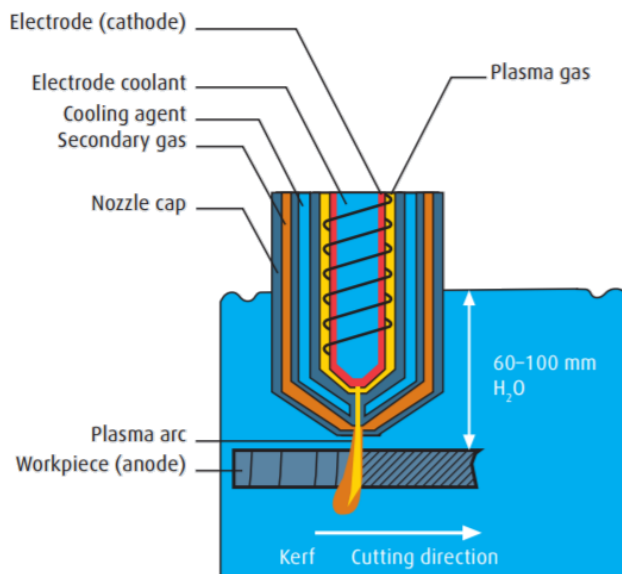
Obrázek 9 – Řezání plasmou se vstřikováním vody [10]

*water injection* – vstřikování vody, *electrode (cathode)* – elektroda (katoda),  
*electrode coolant* – chlazení elektrody, *nozzle coolant* – chlazení trysky,  
*nozzle cap* – obal trysky, *plasma gas* – plasmový plyn, *plasma arc* – plasmový paprsek,  
*workpiece (anode)* – řezaný materiál (anoda), *kerf* – řezná spára,  
*cutting direction* – směr řezání

### 2.2.5 Plasmové řezání pod vodou

Tato varianta technologie plasmového řezání výrazně zvyšuje provozní bezpečnost. Hořákem proudí pouze primární plasmový plyn. Voda rozpouští vznikající kouř a dým, částečně pohlcuje UV záření, snižuje hluk a chladí řezaný materiál. Řezání se provádí asi 60 až 100 mm pod vodním povrchem [10]. Jedná se o nejekologičtější z výše uvedených technologií plasmového řezání. Hrozí zde riziko výbuchu bublin vodíku, jenž se mohou nashromáždit pod řezaným materiálem. Z ekonomického hlediska je pod vodou obvykle výhodné řezat konstrukční oceli o tloušťce přibližně 15 mm a vysokolegované oceli o tloušťce 20 mm [10].





Obrázek 10 – Plasmové řezání pod vodou [10]

*electrode (cathode) – elektroda (katoda), electrode coolant – chlazení elektrody, secondary gas – ochranný plyn, nozzle coolant – chlazení trysky, cooling agent – chladivo, nozzle cap – obal trysky, plasma gas – plasmový plyn, plasma arc – plasmový paprsek, workpiece (anode) – řezaný materiál (anoda), kerf – řezná spára, cutting direction – směr řezání*

### 2.2.6 Plyny pro plasmové řezání

Plasmovým plynem mohou být všechny plyny nebo směsi plynů, jenž mohou sloužit ke tvorbě plasmy nebo k samotnému procesu řezání. Plasmový oblouk se skládá ze dvou hlavních fází, fáze zapálení a fáze řezání. Plyn použitý během procesu se rozděluje na zápalný plyn a řezný plyn. Ty se od sebe mohou lišit nejen z hlediska typu plynu, ale i objemovým průtokem. Zápalný plyn slouží k zapálení plasmového oblouku, usnadňuje zapálení, případně zvyšuje životnost elektrody. Řezný plyn je nezbytný k řezání materiálu, zajišťuje dosažení optimální kvality řezu při řezání různých druhů materiálů. Sekundární plyn chrání plasmový paprsek, chladí a zužuje jej. Zlepšuje kvalitu řezu, chrání trysku při řezání pod vodou, ale i při průniku plasmového paprsku do materiálu.

Správná volba plasmového plynu hraje rozhodující roli v kvalitě a ekonomické efektivitě. Různé druhy materiálu, rozdílná tloušťka, to vše vyžaduje odlišné plasmové médium. Plasmovými médii mohou být plyny, směsi plynů či voda. Aby nebylo po plasmovém řezání nutné další zpracování z důvodu odpovídající kvality řezných hran, měl by být pro daný materiál použit vhodný plasmový plyn. Při výběru vhodného plynu by měly být brány na zřetel fyzikální a mechanické vlastnosti. Pro dosažení vysoké řezné rychlosti a uspokojivé kvality řezu, proud plasmy musí mít dostatečnou kinetickou energii, dobrou tepelnou vodivost a vysoký energetický obsah. Jako plasmový plyn lze použít argon, vodík, dusík, kyslík a jejich směsi, či vzduch. Při posouzení veškerých výhod i nevýhod, není žádný z uvedených plasmových plynů optimální. Ve většině případů je proto použita směs těchto plynů. Volba nevhodné směsi plasmového plynu může vést ke snížení životnosti spotřebních dílů nebo i ke zničení hořáku.

*Tabulka 7 – Srovnání hlavních fyzikálních vlastností plasmových plynů [10]*

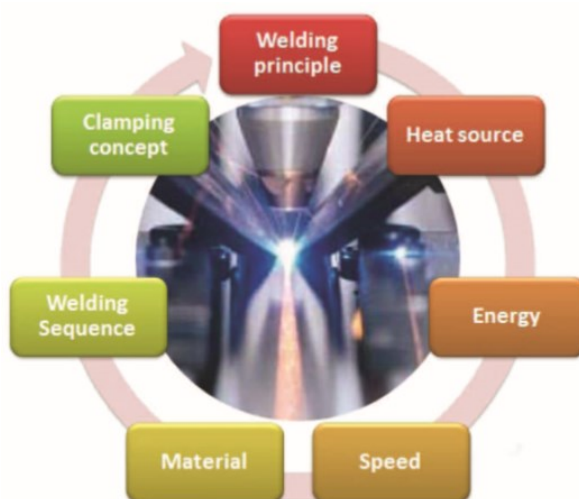
Vlastnost	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	Vzduch
<b>Ionizační energie [eV]</b>	15,5 (14,5)	15,6 (13,5)	12,5 (13,6)	15,8	34
<b>Disociační energie [eV]</b>	9,8	4,4	5,1	-	-
<b>Atomová hmotnost [u]</b>	14	1	16	40	14,4
<b>Tepelná vodivost [W/mK]</b>	24,5	168	24,7	16,6	24,5

### 3 NUMERICKÉ SIMULACE VE SVAŘOVÁNÍ

Většina výrobních společností se při vývoji spoléhá na empirická data a zkušenosti získané v průběhu konstrukce a svařování součástí. Cíleně orientované zlepšování a úpravy výrobních procesů vyžadují značné množství času a vynaložené lidské práce. Při návrhu nového produktu musí být zajištěna jeho funkčnost, které bylo dříve možné docílit pouze zhotovením vzorku výrobku a jeho následným testováním. Typickým příkladem jsou deformace vznikající vlivem svařování, které bylo možné výhradně nalézt uskutečněním výrobních kroků a posléze je eliminovat úpravou technologických parametrů. Použití simulace umožňuje podrobné přezkoumání svařovacích procesů a následný návrh za účelem zdokonalení, zefektivnění, či zlepšení kvality. Moderní software poskytuje spolehlivé simulace v oblasti svařování, které mají četná využití i v sériové výrobě. Pomocí moderního simulačního softwaru je možné vizualizovat podrobné informace během procesu svařování a předem vypočítat různé kombinace procesů. Je možné provést systematickou studii procesu v závislosti na definovaných parametrech a jejich vliv na výsledek. Numerické simulace byly dlouho využívány výhradně na akademické půdě a ve výzkumných zařízeních, protože modelování a následná aplikace výpočtů bylo příliš složité. Využití softwaru za účelem simulace v reálné výrobě nebylo technicky ani finančně možné. Numerické simulace ve své podstatě využívají matematiku k modelování a jeho následnému testování pomocí počítačové techniky. Tato inovace nám umožňuje nejen podrobnější průnik do problematiky, ale i značné finanční i časové úspory. V průběhu simulace je geometrie rozdělena na dílčí části velmi malých rozměrů, těm jsou přiřazovány rovnice, které jsou následně řešeny.

Aby kovovýroba dosahovala potřebných kvalit a ekonomické rentability, musí být neodmyslitelně spjata s procesy spojování materiálů. Vysoká kvalita zajišťuje konkurenceschopnost výroby, vyžaduje však efektivní aplikaci výrobních procesů. Ve srovnání s jinými procesy spojování je svařování výhodné pro tvarově složitá spojení, či spojení přenášející velká namáhání. Umožňuje maximální přenos síly, zatímco tloušťka spoje není výrazně zvětšena. Svařování tak napomáhá redukci hmotnosti koncového výrobku a lze jej využít i při následných opravách. Cílem svařování je vytvořit reprodukovatelný, spolehlivý produkt s minimální deformací, při zachování nízkých výrobních nákladů, bez nutnosti drahých přepracování a kontrol kvality. Nevýhodou svařování je vznik deformací a změny struktury materiálu vlivem vneseného tepla.

Svařování je složitý výrobní proces zahrnující řadu různých faktorů. Mezi ně patří princip svařování, rychlost, svařovací zdroj, svařovací cyklus, přídavný materiál, množství přivedené energie, kombinace materiálů a jejich tloušťka, ale i geometrie svarového spoje, postup kladení housenek či jejich počet. Všechny tyto faktory je nutné optimalizovat, aby bylo docíleno vzniku svarového spoje potřebné kvality. Na konečný výsledek má z hlediska možných deformací významný vliv koncepce upínání, body uchopení a jejich geometrie a velikost působící síly. V oblasti návrhu a realizace svařování jsou nezbytné zkušenosti a odborné znalosti. Zjišťování vad ve svarových spojkách pomocí rentgenové nebo ultrazvukové analýzy je značně finančně nákladné. Protože je spolehlivost daného procesu enormně důležitá, je vhodné provedení výzkumu za pomoci numerických simulací a analýz. Správné navržení svařovacího procesu je v důsledku velkého množství možných kombinací parametrů ovlivňujících výslednou kvalitu obtížné.



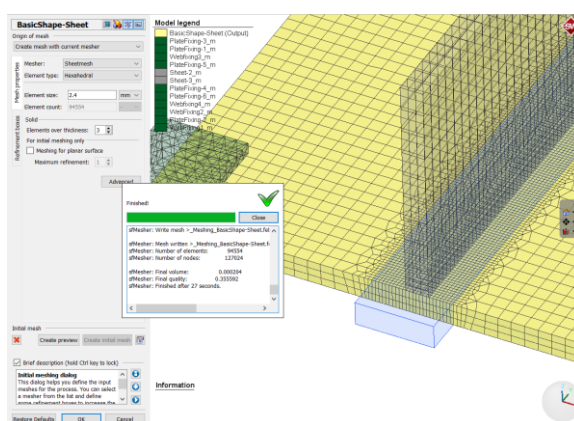
Obrázek 11 – Faktory ovlivňující svařovací proces [2]

### 3.1 Simufact Welding 8

Simufact Welding je navržen pro možnost modelování a simulace širokého spektra procesů spojování materiálů za pomoci tepla. Mezi tyto procesy spadá svařování elektrickým obloukem, odporové svařování, svařování laserovým či elektronovým paprskem a pájení. Dále nabízí možnost modelování procesů tepelného zpracování, různé možnosti nastavení ochlazování, či uvolnění mechanického zatížení svařované konstrukce. S pomocí simulačního softwaru Simufact Welding je možné spolehlivě

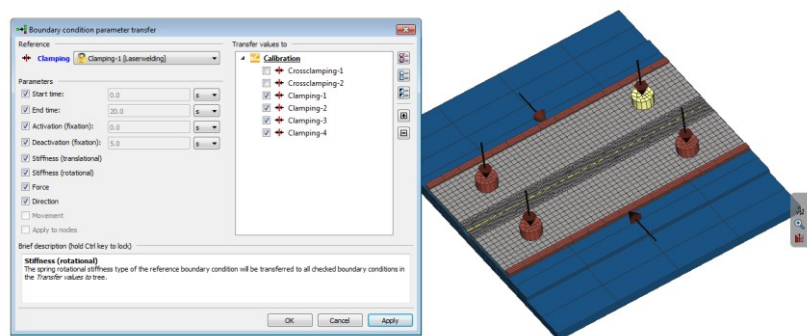
navrhnout svařovací procesy založené na výrobních datech. Díky otevřené datové struktuře je nyní možné použít simulované spoje v dalších napěťových analýzách pro vypočtení lokálních strukturálních změn, mechanické odolnosti a trvalého namáhání, ale i deformací. Program Simufact Welding také uživatelům umožňuje přenášet data z předchozích výrobních procesů jako základ pro simulace svařování. Vypočtené deformace mohou být závislé i na tom, zda byl brán zřetel na předchozí zkušenosti. Touto cestou mohou být relativně přesně posouzeny podmínky po svařování. Správné nastavení a optimalizaci procesů probíhajícího výrobního procesu umožňuje zahrnutí získaných dat. Příkladem mohou být procesní teploty v průběhu tvářecího procesu. Virtuální vytvoření a zkoumání svařovacích procesů nabízí široké spektrum výhod nejen z hlediska ekonomického, ale i z hlediska spolehlivosti návrhu výrobních kroků. Program Simufact Welding poskytuje možnost tvorby moderních simulací v oblasti svařování a jejich aplikaci do reálné výroby. Program je neustále vyvíjen a přizpůsobován aktuálním požadavkům průmyslu. Tento software umožňuje detailnější průnik do problematiky procesu svařování, návrh ekonomicky přijatelnějších řešení současně s dosažením vyšší kvality. Simufact Welding 8 sebou oproti svým předcházejícím verzím přináší četná zlepšení a inovace.

Simufact Welding 8 nabízí vlastní zabudovanou možnost tvorby síťování, která je uživatelsky přívětivá a intuitivní. Uživatelé mohou vytvářet základní geometrie přímo v programu a pomocí interního nástroje vytvořit síťování. Technologie možnosti tvorby síťování podporuje také lokální zjemňování sítě, což umožňuje zpřesnění výpočtů v oblasti svarů. Tato funkce přináší uživateli větší komfort při každodenní práci při tvorbě numerických simulací svařování. Odpadá nutnost síťování pomocí jiného produktu firmy MSC Software, či produktů třetích stran.



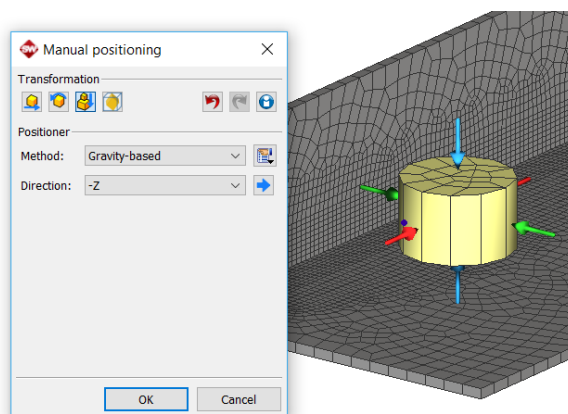
Obrázek 12 – Tvorba síťování Simufact Welding 8 [7]

Nová verze s sebou přináší také více realistický systém nástrojů upínání. Během simulace mohou být svorky aktivovány, deaktivovány nebo mohou být aktivní pouze po určitou dobu. Vlastnosti svorek mohou být přenášeny, čímž dochází ke značné úspoře práce potřebné k vytvoření a konfiguraci velkého počtu nástrojů s totožnými či podobnými vlastnostmi. To je výhodou zejména při tvorbě složitých sestav s vysokým počtem nástrojů, kdy je doba potřebná pro správné nastavení modelu výrazně zkrácena.



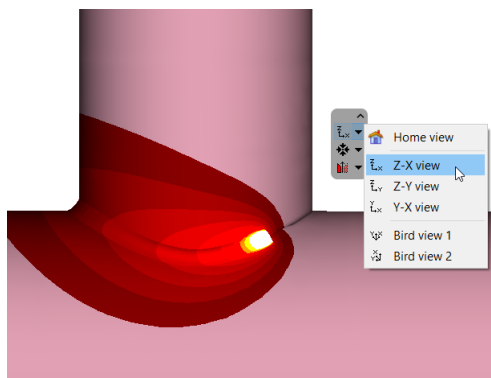
Obrázek 13 – Vylepšený systém upínání Simufact Welding 8 [7]

Z uživatelského hlediska je také přínosné intuitivní a snadné nastavení modelu pomocí automatického polohování součástí a jejich zarovnání v pracovním prostoru. Simufact Welding 8 je automaticky schopen do výpočtu chování geometrie zahrnout také vliv gravitace v případě, že se jedna geometrie nachází na druhé. Do výpočtu je zahrnuto i tření, přesnost výpočtu je řízena samotným uživatelem. Nástroj sloužící k polohování umožňuje snadné umístění geometrií vzhledem ke vzájemné poloze.



Obrázek 14 – Systém automatického polohování součástí Simufact Welding 8 [7]

Ve svém grafickém rozhraní nabízí rozšířené a vylepšené funkce pro import a export souborů. Uživatelé jsou nyní flexibilnější při importu souborů ze softwarových produktů jiných výrobců. Použitelnost uživatelského rozhraní je zvýšena také díky novým interaktivním modelům a novým možnostem zobrazení výsledků. Widget kombinuje funkce pro ovládání pohledu (úhly pohledu, zoom, zrcadlení, rotace, reset na výchozí hodnoty) a synchronizaci zobrazení (synchronizace několika pohledů otevřených v jednom projektu). Uživatel má možnost využití také tzv. živé synchronizace, při níž se automaticky mění nastavení zobrazení typu výsledku ve všech otevřených pohledech. To umožňuje efektivnější a rychlejší vyhodnocování výsledků simulací, porovnání různých modelů a jejich výsledků.



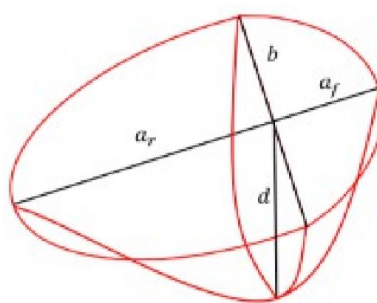
Obrázek 15 – Interaktivní model a zobrazení výsledku Simufact Welding 8 [7]

### 3.1.1 Tepelné zdroje

Tepelný zdroj je jedním z nejdůležitějších parametrů modelu. Pro procesy spojování materiálu pomocí vneseného tepla je tepelný zdroj obvykle reprezentován tzv. ekvivalentním zdrojem tepla. Ten představuje matematické znázornění objemového tepelného toku vně tavné lázně a v okolním materiálu. Charakteristika tepelného zdroje včetně jeho typu a tvaru není výsledkem simulace, nýbrž vstupním parametrem. V závislosti na principu svařování a použitých materiálech je k dispozici několik různých modelů. Kalibrace modelového tepelného zdroje, díky němuž dochází ke vzniku svarové lázně, je z hlediska správnosti simulace nezbytná. Ekvivalentní zdroje tepla umožňují v závislosti na kvalitě kalibrace zohlednění geometrie tavné lázně, geometrie tepelně ovlivněné oblasti, teploty v závislosti na poloze vůči svarovému kovu. Simufact Welding poskytuje pro tvorbu simulací dva předdefinované modely tepelného zdroje.

Konvenční tepelný zdroj charakterizovaný Goldakovým modelem dvojitého elipsoidu, který je vhodný pro většinu procesů obloukového svařování. Tento model tepelného zdroje charakterizují následujícími parametry:

- $a_f$  – přední délka elipsoidu,
- $a_r$  – zadní délka elipsoidu,
- $b$  – šířka elipsoidu,
- $d$  – hloubka,
- $M$  –Gaussův parametr.



Obrázek 16 – Goldakův model tepelného zdroje ze Simufact Welding 8

Hodnotu šířky a hloubky lze zjistit pomocí mikrofotografie průřezu svaru. Veličina  $a$  značí předpovídanou výšku svaru. Gaussův parametr popisuje faktor koncentrace tepelného toku uvnitř tepelného zdroje. Ostatní hodnoty lze přibližně určit pomocí následujících vztahů:

$$a_f = (a + 1,5) * 0,6 \text{ [mm]} \quad (1)$$

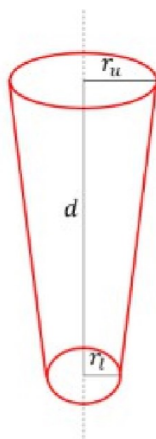
$$a_r = 2,2 * (a + 1,5) \text{ [mm]} \quad (2)$$

$$b = a + (1 \div 2) \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$d = a + (2 \div 5) \text{ [mm]} \quad (4)$$

Druhým tepelným zdrojem, jenž je v programu Simufact Welding 8 definován, je laser. Pro laser je vstupní energie tepelného zdroje rozdělena na objemový a povrchový zdroj tepla. Tento tepelný zdroj je definován jako kužel s horním poloměrem, dolním poloměrem a hloubkou.





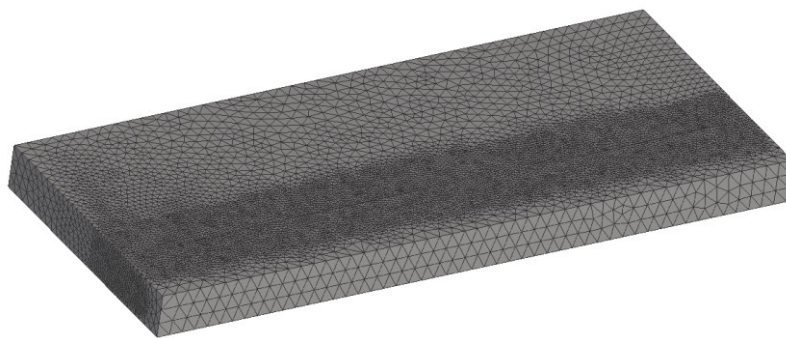
Obrázek 17 – Model laserového zdroje tepla ze Simufact Welding 8

### 3.2 Vstupní parametry pro simulaci tepelného dělení

V následující kapitole budou zmíněny jen důležité parametry a údaje nezbytné pro samotnou simulaci procesu tepelného dělení. Trojrozměrné modely zkušebních desek byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2018 a následně ve formátu STL importovány do projektu. Podrobný popis postupu tvorby projektu je detailně vypracován v příloze A – Vytvoření projektu v programu Simufact Welding 8.0. Z důvodu absence možnosti tepelného dělení byly simulace uskutečněny za pomoci svařování.

#### 3.2.1 Volba síťování

Velmi významným faktorem z důvodu dosažení potřebné přesnosti výsledku je síť konečných prvků. Je nutno zvolit správný druh sítě a optimální velikost prvku. Na výsledném počtu prvků sítě neboli podoblastí, závisí doba potřebná k výpočtu simulace. Jako typ síťování byl zvolen Tetmesh a to konkrétně Tetrahedral 134 o velikosti prvku 6 mm a minimální velikosti hrany prvku 0,5 mm. Výsledná síť obsahuje u jedné desky 74909 a u druhé 56433 elementů. Z důvodu zvětšení přesnosti výpočtu bylo v okolí uvažované řezné spáry provedeno lokální zjemnění sítě úrovně 2. Lokální zjemnění prvků sítě bylo na každé z desek nastaveno do vzdálenosti 20 mm od uvažované svařovací trajektorie.



*Obrázek 18 – Nasíťované desky včetně zjemnění v okolí svařovací trajektorie*

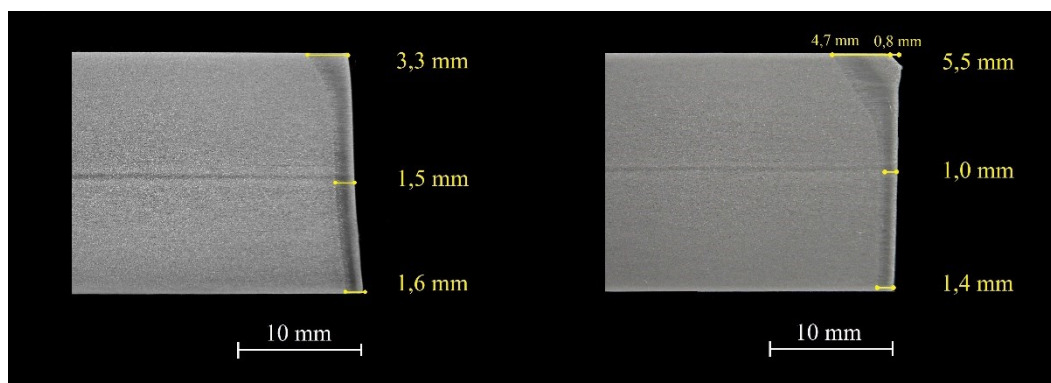
### **3.2.2 Volba materiálu**

Za účelem simulace byl z knihovny Simufact Welding 8 zvolen materiál S355J2G3-MPM-sw. Volba byla provedena na základě materiálu S355 použitého během experimentu uskutečněném v rámci bakalářské práce. Obsahem knihovny je mnoho materiálových údajů včetně chemického složení, mechanických či fyzikálních vlastností, ARA a IRA diagramu, uhlíkového ekvivalentu, hustoty, tepelné vodivosti a kapacity, křivek zpevnění, teploty solidu a likvidu, modulu pružnosti atd. Kompletní specifikace vybraného materiálu je obsažena v příloze B – Materiálový list z knihovny Simufact Welding 8.

### **3.2.3 Volba tepelného zdroje**

Tepelný zdroj hraje z hlediska výsledku simulace procesů tepelného dělení klíčovou roli. Závisí na něm velikost tepelně ovlivněné oblasti, získané teplotní cykly, či míra fázových transformací, jenž v materiálu vlivem vneseného tepla probíhají. Správná optimalizace zdroje tepla je nezbytná z důvodu dosažení výsledků simulace patřičné přesnosti. Za účelem kalibrace rozměrů a výkonu tepelných zdrojů byly použity rozměry tepelně ovlivněných oblastí určených z metalografické zkoušky uskutečněné v rámci experimentální části bakalářské práce. Jelikož v programu Simufact Welding 8 není možné simulovat přímo procesy termického dělení, je simulace nutně uskutečnit pomocí procesu svařování. Během simulace je řezná spára z důvodu nutnosti využití procesu svařování nahrazena svarovým kovem. Při kalibraci velikosti tepelně ovlivněné oblasti pro potřeby

simulací je nutné uvažovat i velikost řezné spáry, která činila u plamene 3,3 mm a u plasmy 2,1 mm.



Obrázek 19 – Experimentálně získané velikosti TOO, vlevo pro řezání plasmou, vpravo pro řezání kyslíkem [16]

Za účelem simulace procesu řezání plamenem byl použit Goldakův model tepelného zdroje, který je zobrazen na Obrázku 16. Z důvodu dosažení větší tvarové a rozměrové shody s experimentálně získanou TOO byly pro tuto simulaci použity dva svařovací roboti. Oba svařovací roboti běží současně, rozdíl činí pouze velikost a tvar tepelného zdroje. První tepelný zdroj vytváří rozšířenou oblast TOO v místě vstupu do materiálu, zatímco druhý realizuje zbývající průnik po celé tloušťce řezaného materiálu.

Tabulka 8 – Parametry tepelných zdrojů pro simulaci řezání plamenem

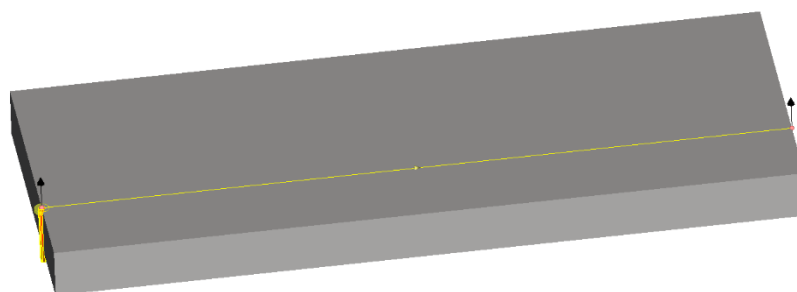
Parametr	Svař. robot číslo 1	Svař. robot číslo 2
Rychlost svařování [m/s]	0,0054	0,0054
Proud [A]	150	250
Napětí [V]	70	70
Účinnost [-]	0,6	0,6
Přední délka elipsoidu ( $a_f$ ) [mm]	9	2
Zadní délka elipsoidu ( $a_r$ ) [mm]	9	2
Šířka elipsoidu ( $b$ ) [mm]	9	2
Výška elipsoidu ( $d$ ) [mm]	0,5	150

Pro simulaci řezání plasmou byl tepelný zdroj substituován laserem. Použitý model laserového tepelného zdroje je na *Obrázku 17* v podkapitole 3.1.1 *Tepelné zdroje*.

*Tabulka 9 – Parametry tepelného zdroje pro simulaci řezání plasmou*

<b>Rychlost svařování [m/s]</b>	0,03
<b>Proud [A]</b>	500
<b>Napětí [V]</b>	220
<b>Účinnost [-]</b>	0,6
<b>Horní poloměr kužele [mm]</b>	1,4
<b>Spodní poloměr kužele [mm]</b>	1,2
<b>Výška kužele [mm]</b>	25
<b>Poloměr povrchové tepelné vrstvy [mm]</b>	3
<b>Výška povrchové tepelné vrstvy [mm]</b>	1,5

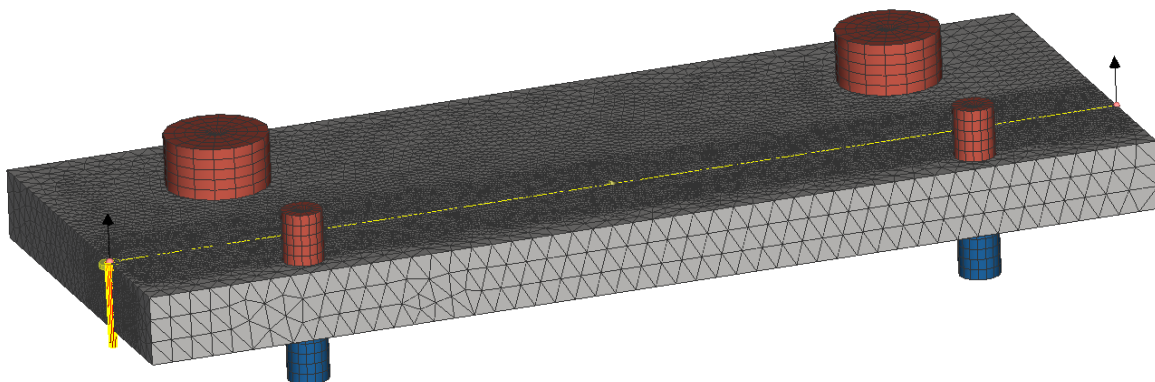
Jelikož modely sloužící k simulacím disponují relativně jednoduchou konstrukcí, k vytvoření svařovací trajektorie stačí pouhé dva body. Jedná se o dráhu délky 300 mm, po níž se bude po dobu simulace pohybovat svařovací robot. Nachází se na povrchu materiálu, v místě styku obou desek. Je orientována vertikálně, ve směru od kladné složky osy  $z$  k záporné složce. Na *Obrázku 20* je patrné umístění trajektorie svařovacího robota, včetně modelového tepelného zdroje. Směr pohybu svařovacího robota je označen malou žlutou šipkou, umístěnou uprostřed trajektorie. Konec i začátek trajektorie je znázorněn dvěma šipkami směřujícími vzhůru.



*Obrázek 20 – Poloha svařovací trajektorie ve vztahu k modelu*

### 3.2.4 Volba upnutí

Každá z desek byla upnutá za pomoci dvou pevných válcovitých podložek ze strany spodní a dvou pevných svěrek o stejném průměru ze strany horní. U větší desky činí průměr i výška válcovitých upínacích elementů 15 mm, zatímco u menší desky je průměr 6 mm. Upnutí má významný vliv na deformace a zbytková napětí vznikající v okolí svaru. Jelikož předmětem simulace není svařování nýbrž tepelné dělení, není pro naše potřeby volba upnutí příliš důležitá. Aby simulace v programu Simufact Welding 8 mohla proběhnout, model musí obsahovat nejméně jednu podpěru. Koncepce upnutí celého modelu včetně svařovací trajektorie i tepelného zdroje je viditelná na *Obrázku 21*.



*Obrázek 21 – Model sloužící k simulaci řezání plasmou v Simufact Welding 8*

### 3.2.5 Nastavení procesních parametrů

Z hlediska přesnosti výsledků simulace hrají též významnou roli parametry tepelné výměny. Ty byly ponechány na hodnotách, které jsou v programu Simufact Welding 8 přednastaveny. Tyto parametry jsou uvedeny v *Tabulce 10*. Výpočet simulace byl nastaven na termomechanický. Za účelem získání obsahu strukturních složek, vznikajících v důsledku tepla vneseného procesem svařování, byla ve výpočtu aktivována možnost výpočtu fázových transformací. Aby bylo možné výpočet fázových transformací uskutečnit, musí materiál zvolený k simulaci obsahovat ARA diagram. Tato podmínka je u materiálu S355J2G3-MPM-sw použitého k simulacím splněna. Celkové časy simulací se odvíjejí od zadaných hodnot řezných rychlostí pro jednotlivé technologie tepelného dělení a zahrnují taktéž dobu potřebnou k ochlazení. Hodnota doby sloužící k ochlazení byla pro obě simulace zvolena 80 sekund. Čas potřebný k vykonání řezu plasmou

je 10 sekund, u technologie řezání plamenem 55,56 sekund. Hodnoty řezných rychlostí pro jednotlivé technologie byly zvoleny na základě reálného experimentu v rámci bakalářské práce. Celkový čas simulace je 90 sekund pro řezání plasmou a 135,56 sekund pro řezání plamenem. Veškeré použité upínací komponenty byly u obou případů aktivní po celou dobu simulace.

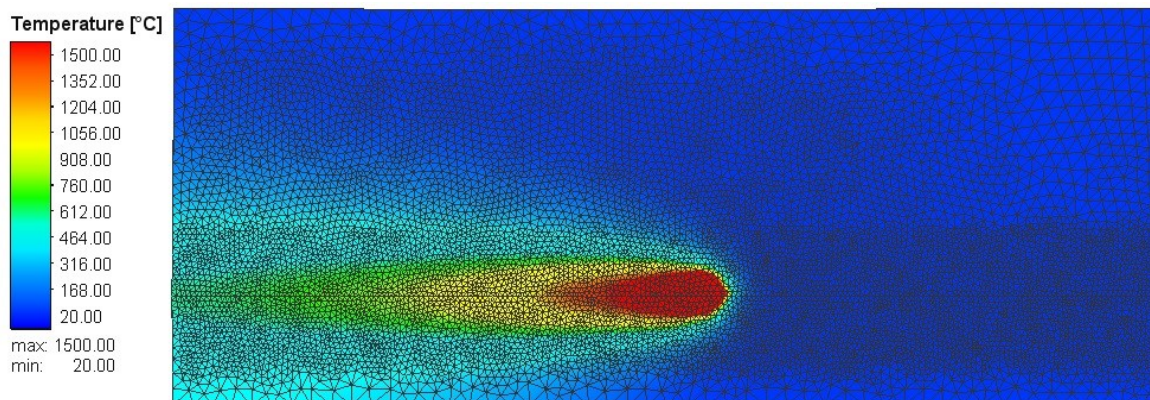
*Tabulka 10 – Parametry tepelné výměny simulací*

<b>Teplota okolí [°C]</b>	20
<b>Součinitel tepelné výměny s prostředím [W/m<sup>2</sup>*K]</b>	20
<b>Součinitel tepelné výměny mezi tělesy [W/m<sup>2</sup>*K]</b>	1000
<b>Koeficient sálání [-]</b>	0,6

### 3.3 Výsledky simulací

Jakmile je simulace se zadanými vstupními parametry spočítána, dostáváme k dispozici výsledky ve formě grafických náhledů či grafů. Tyto výsledky můžeme podrobit další analýze. Veškeré výsledky zobrazené prostřednictvím grafických náhledů lze generovat v závislosti na čase či v určitém průřezu řezaného materiálu. Díky těmto možnostem si lze udělat lepší představu o procesech probíhajících v materiálu v průběhu řezného procesu, či během chladnutí na teplotu okolí. Na *Obrázku 22* lze spatřit průběh teploty během pohybu svařovacího robota, který v našem případě zastupuje řezací hořák. Materiál je intenzivně zahříván prostřednictvím tepelného zdroje svařovacího robota, jeho aktuální poloha se na obrázku nachází v pravé části červené oblasti. Jak se svařovací robot postupně pohybuje, materiál ohřátý na vysokou teplotu postupně chladne. Barva pomyslné oblasti svaru se mění od sytě červené, přes žlutou a světle modrou. Dochází k postupnému šíření tepla dále do materiálu, důkazem tohoto jevu je zleva se rozšiřující světle modrá oblast. Po určité době by vlivem tepelné výměny s prostředím materiál zkušebních desek v celém svém objemu vychladl na teplotu okolí, která pro naše účely nastavena na hodnotu 20 °C a je znázorněna tmavě modrou barvou.

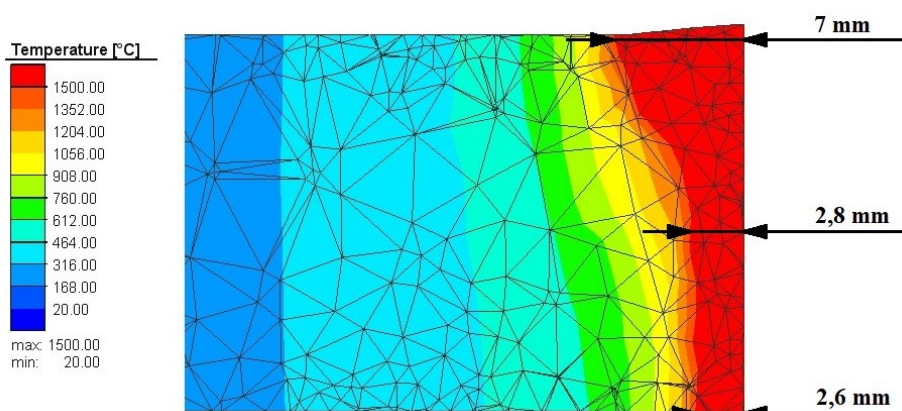




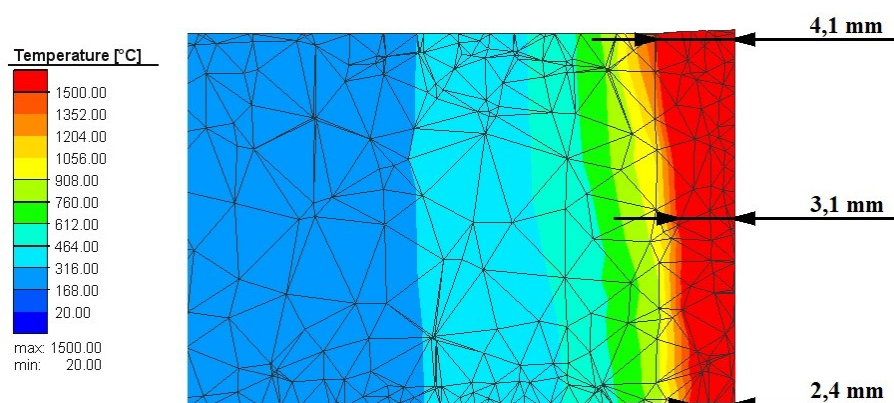
*Obrázek 22 – Rozložení teploty na povrchu materiálu v průběhu simulace procesu řezání plamenem*

### 3.3.1 Stanovení rozměru tepelně ovlivněné oblasti

Pomocí nástroje Weld monitor byla stanovena přibližná velikost tepelně ovlivněné oblasti vně materiálu. U technologie řezání plamenem je tepelně ovlivněná oblast značně rozšířena přibližně v horní třetině tloušťky materiálu, ve zbylé části je její rozměr téměř konstantní. Tepelně ovlivněná oblast získaná ze simulace řezání plasmou vykazuje pouze malé rozšíření z horní strany, sahající přibližně do čtvrtiny tloušťky materiálu. Postupně se její šířka směrem dolů zmenšuje. Rozměry a tvar tepelně ovlivněné oblasti pro jednotlivé technologie získané na základě simulací jsou znázorněny na *Obrázku 23* a *Obrázku 24*. U simulace řezání plasmou je tepelně ovlivněná oblast výrazně menší. To je zapříčiněno zejména rozdílnou řeznou rychlostí jednotlivých technologií a odlišnou intenzitou tepelného zdroje.



*Obrázek 23 – Velikost TOO získaná ze simulace řezání plamenem*



Obrázek 24 – Velikost TOO získaná ze simulace řezání plasmou

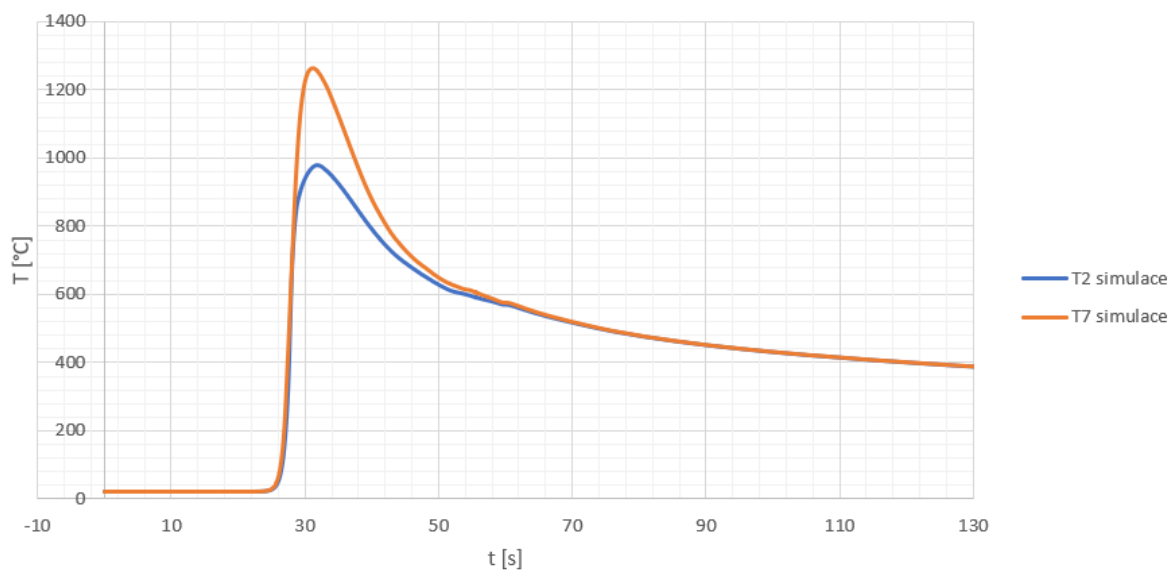
### 3.3.2 Teplotní cykly

Za účelem sledování teploty v závislosti na konkrétní poloze v materiálu v průběhu času, byly do každého modelu umístěny dva snímací body. Pro danou simulaci byly tyto body umístěny vždy ve stejné vzdálenosti od začátku svařovací trajektorie. Poloha těchto bodů vůči tepelně ovlivněné oblasti byla určena na základě odměřené polohy termočlánku použitých během experimentu v rámci bakalářské práce.

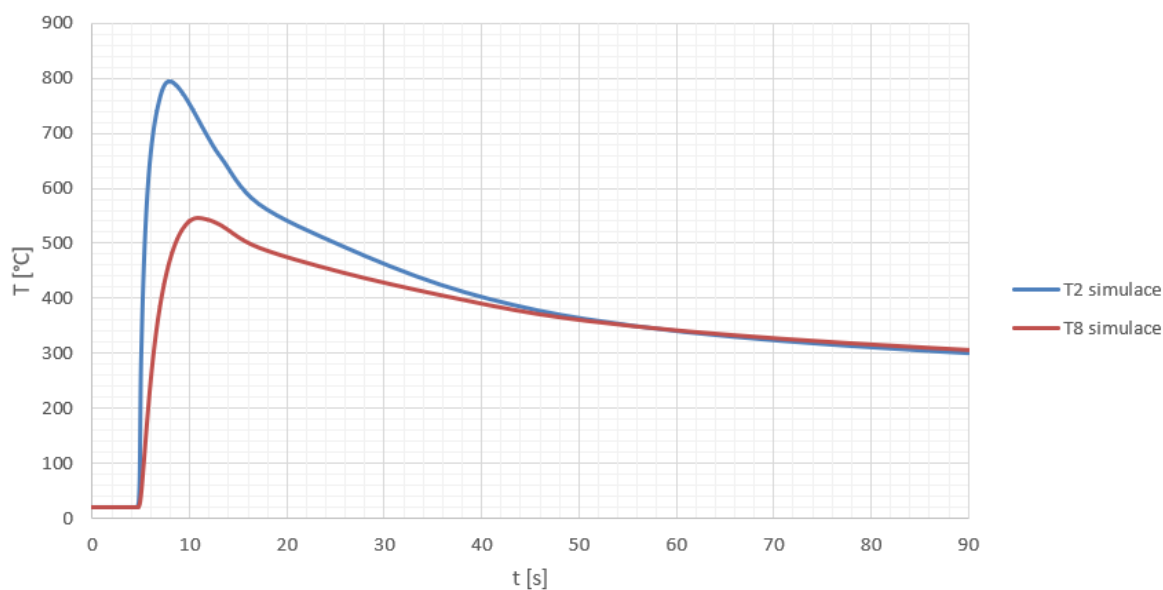
*Graf 4* zobrazuje teplotní cykly získané na základě simulace řezání plamenem. Snímaný bod T2 byl umístěn ve vzdálenosti 4,76 mm od osy řezu a ve vzdálenosti 10 mm od povrchu materiálu. Bod T7 byl situován 4,89 mm od osy řezu a v hloubce 5 mm pod povrchem materiálu. U bodu T2 nabyla teplota maximální hodnoty 978,8 °C. U bodu T7 dosáhla teplota maxima 1261,6 °C.

Teplotní cykly získané v rámci simulace řezání plasmou se nachází v *Grafu 5*. Bod T2 se u simulace řezání plasmou nacházel 4,62 mm od osy řezu v hloubce 10 mm. Bod T8 byl od osy řezu vzdálen 8,52 mm, v hloubce 5 mm pod povrchem materiálu. U simulace řezání plasmou dosahuje maximální naměřená teplota následujících hodnot. Ve snímaném bodu T2 794,8 °C a u bodu T8 545,1 °C.





*Graf 4 – Teplotní cykly v průběhu simulace řezání plamenem*



*Graf 5 – Teplotní cykly v průběhu simulace řezání plasmou*

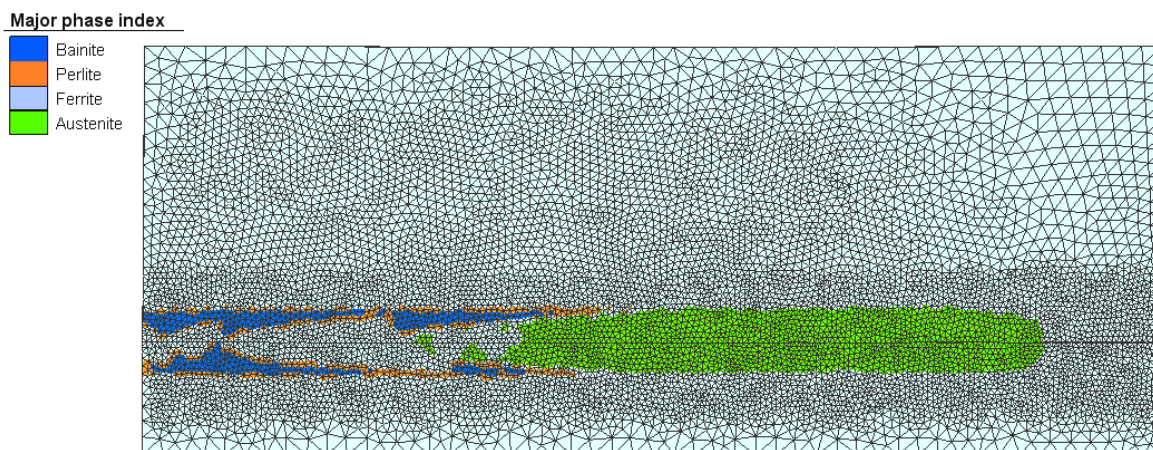
### 3.3.3 Obsah strukturních složek

Základní struktura oceli S355 je převážně feritická, pouze s malým obsahem perlitu. Obsah perlitu byl u zvoleného vstupního materiálu simulací zanedbán. Výsledné fázové složení oblasti ovlivněné vneseným teplem je závislé na ARA diagramu materiálu vybraného z knihovny Simufact Welding 8, a na rychlosti ochlazování. Jednotlivé strukturní fáze se liší nejen svými vlastnostmi, ale také řídicími mechanismy vzniku.

V důsledku ohřevu materiálu vlivem pohybujícího se tepelného zdroje nejprve dochází při překročení teploty 1350 °C (teplota austenitizace) k přeměně feritické struktury na austenitickou. Následně při dosažení teploty 1500 °C (teplota tavení) vzniká tavenina. Chladnutím taveniny postupně vzniká austenit, při poklesu pod teplotu 1450 °C (teplota solidu) je struktura plně austenická.

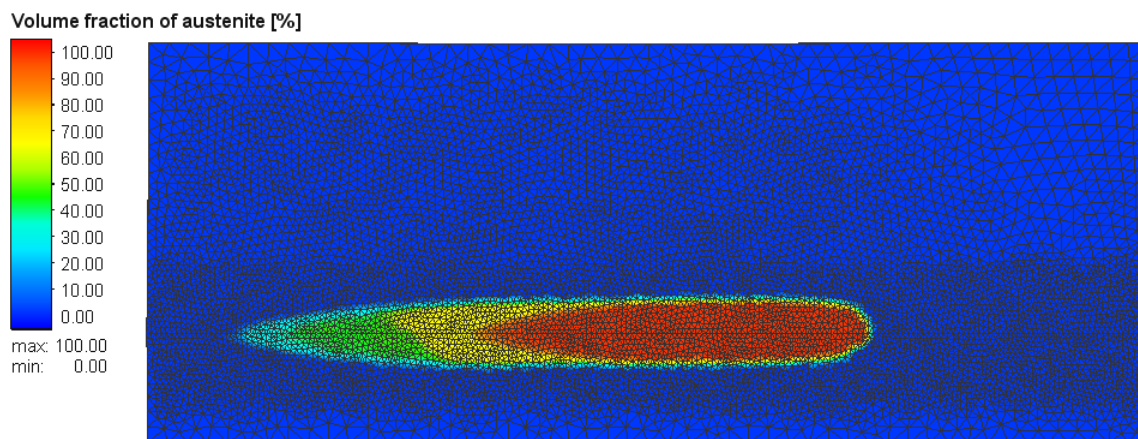
Vlivem dalšího ochlazování pod teplotu 809,47 °C ( $A_{C3}$ ) postupně zaniká austenit a vzniká ferit. Během chladnutí pod teplotu 692,85 °C ( $A_{C1}$ ) nastává perlitická přeměna, během níž postupně zcela mizí austenit. Na *Obrázku 25* je patrný postupný vývoj výskytu strukturních složek vlivem probíhajících fázových transformací v průběhu simulace procesu řezání kyslíkem. Zatímco u pravého konce světle zelené oblasti působí svařovací robot a dochází ke vzniku austenitu, levá strana desky díky probíhajícím fázovým přeměnám již austenit neobsahuje.

Vznik a postupný zánik austenitu v průběhu simulovaného procesu řezání kyslíkem uvádí *Obrázek 26*. Orientační rozložení strukturních složek simulace řezání plasmou a kyslíkem po uplynutí doby chladnutí jsou vyobrazena na *Obrázku 27* a *Obrázku 28*. Tepelně ovlivněná oblast je u obou případů tvořena směsí feritu, perlitu a bainitu.

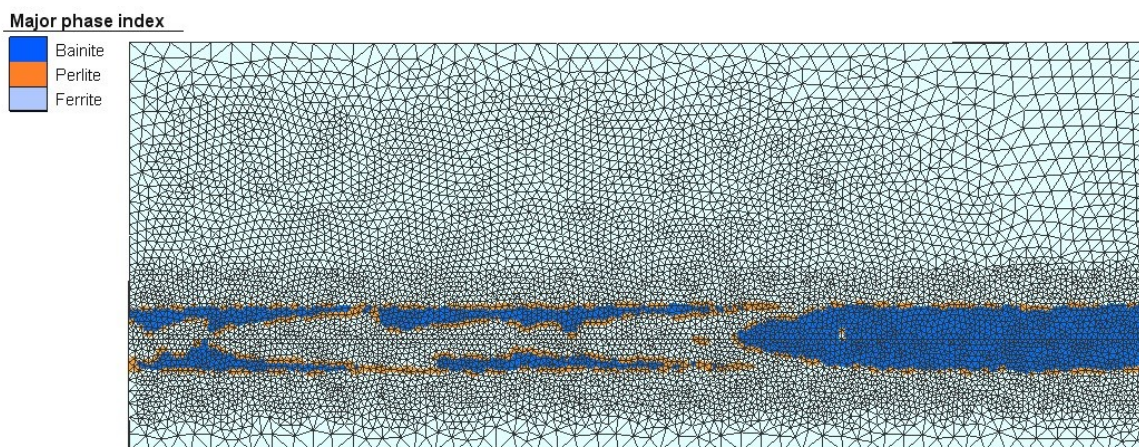


*Obrázek 25 – Zastoupení strukturních složek v průběhu simulace řezání plamenem*

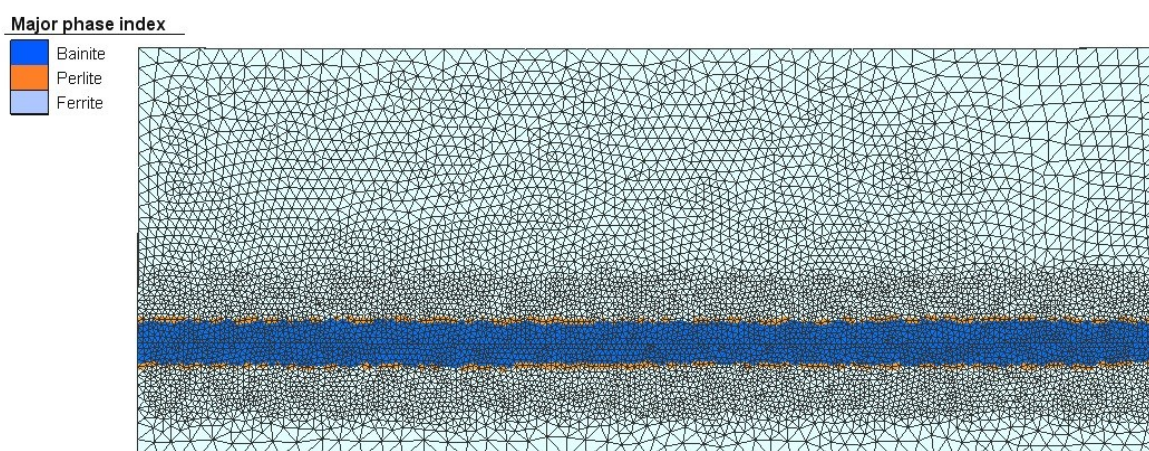




*Obrázek 26 – Obsah austenitu v průběhu simulace řezání plamenem*



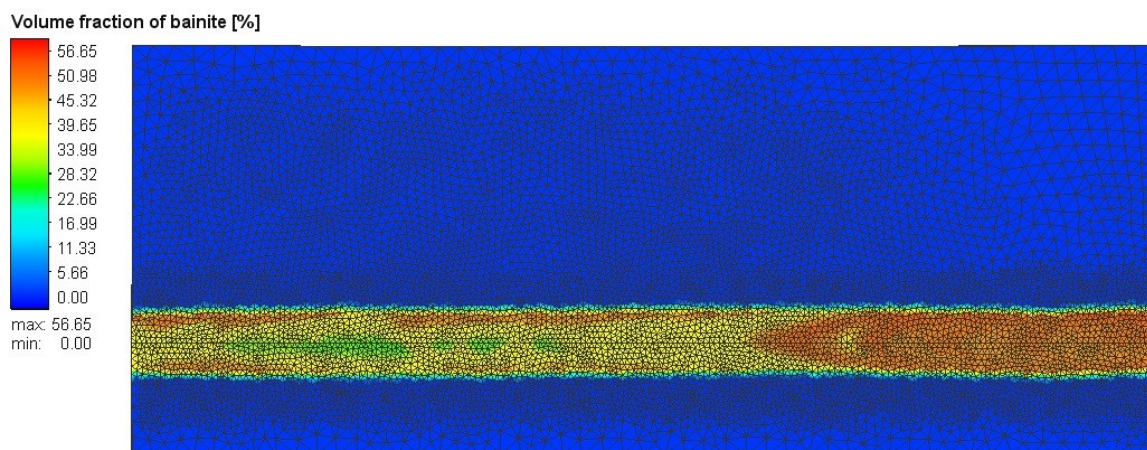
*Obrázek 27 – Zastoupení strukturních složek po simulaci řezání plamenem*



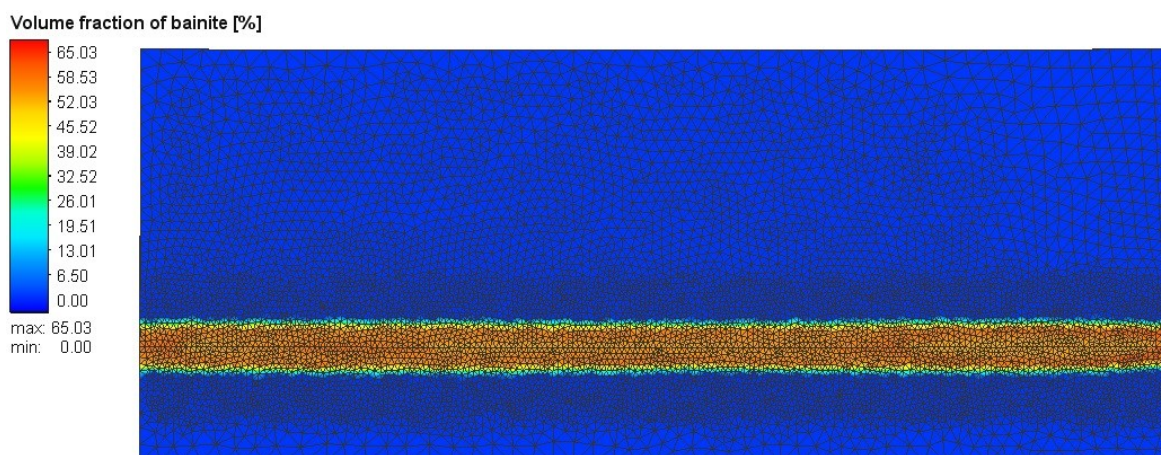
*Obrázek 28 – Zastoupení strukturních složek po simulaci řezání plasmou*



Výsledný obsah bainitu v oblasti ovlivněné teplem vlivem simulovaného řezného procesu po uplynutí ochlazovací doby znázorňuje *Obrázek 29* a *Obrázek 30*. U simulace řezání plamenem dosahuje množství bainitu maximální hodnoty 56,65 %. Tato oblast se nachází přibližně v poslední třetině uvažované řezné trajektorie, v důsledku výrazně rychlejšího ochlazení materiálu po ukončení působení tepelného zdroje. Předcházející část obsahuje bainitu přibližně okolo 40 %. Vypočítaný obsah bainitu po simulaci řezání plasmou v tepelně ovlivněné oblasti je maximálně 65,03 %. Obsah bainitu v tepelně ovlivněné oblasti je na rozdíl od simulace řezání plamenem téměř neměnný po celé délce řezu. To je zapříčiněno zejména vlivem přibližně pětikrát vyšší řezné rychlosti, díky čemuž materiál v okolí řezu rychleji chladne. Chladnutí probíhá konstantněji po celé délce řezu.

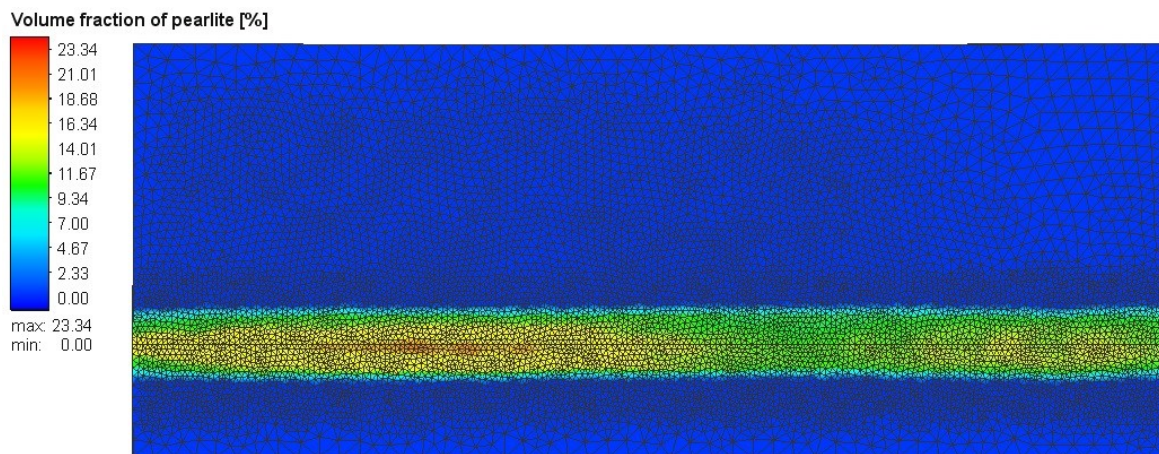


*Obrázek 29 – Vypočítaný obsah bainitu po simulaci řezání plamenem*



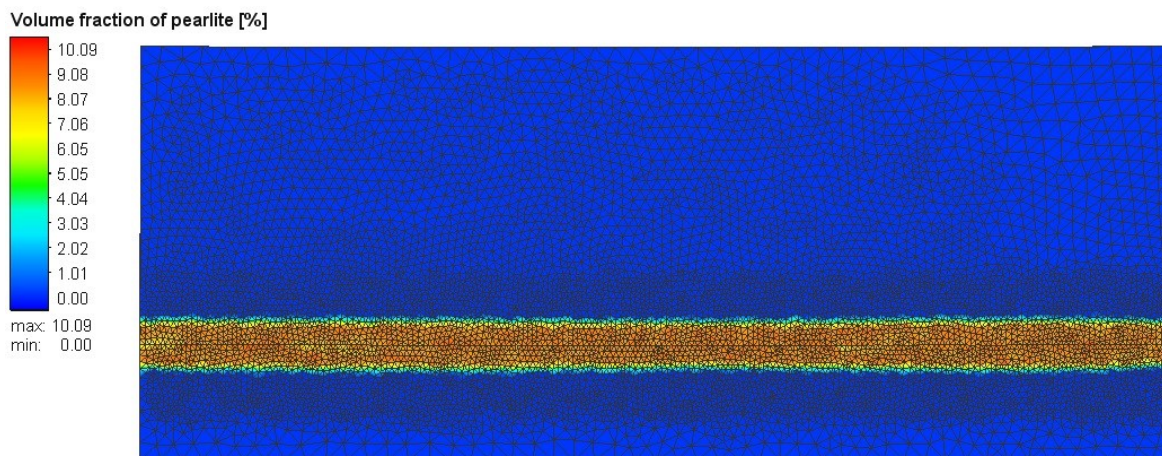
*Obrázek 30 – Vypočítaný obsah bainitu po simulaci řezání plasmou*

Z důvodu pomalejšího ochlazování, vlivem delšího působení tepelného zdroje, je vypočítaný obsah perlitu vyšší u technologie řezání plamenem. U plamene dosahuje obsah perlitu v malé oblasti až 23,3 %, ve většině tepelně ovlivněné oblasti se pohybuje přibližně v rozmezí 17 % až 10 %. Na přechodu mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem se hodnota množství perlitu pohybuje okolo 7 %.



*Obrázek 31 – Vypočítaný obsah perlitu po simulaci řezání plamenem*

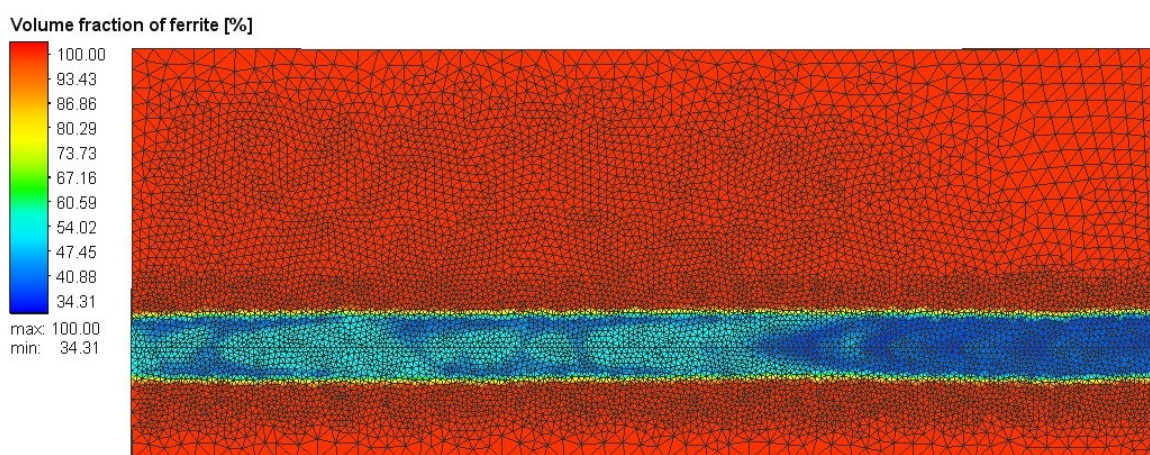
U technologie řezání plasmou je předpokládané množství perlitu maximálně 10,09 %. Vyšších hodnot obsah perlitu dosahuje po celé délce trajektorie řezu, na níž je výrazně rovnoměrněji rozložen. Na hranici přechodu mezi základním materiálem a tepelně ovlivněnou oblastí se obsah perlitu u technologie řezání plasmou pohybuje okolo 3 %.



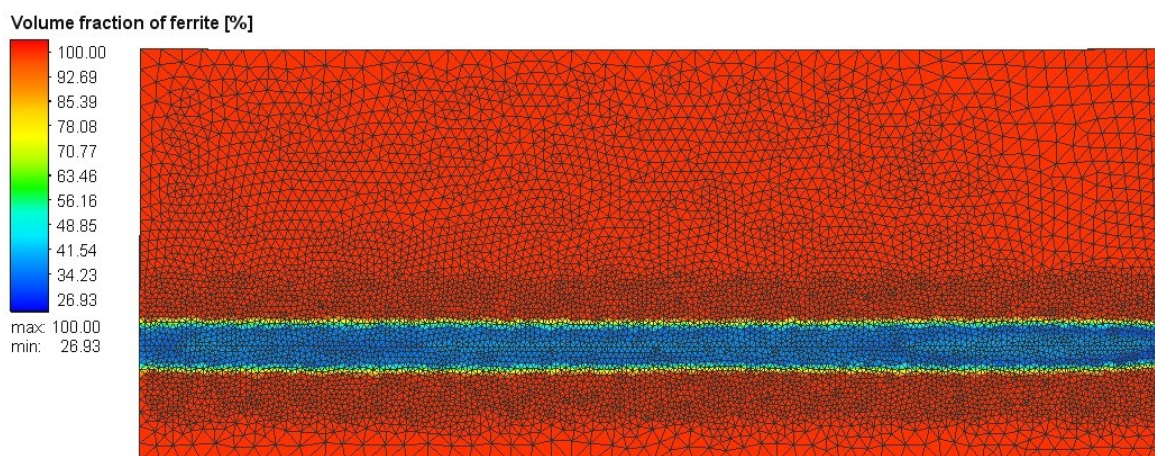
*Obrázek 32 – Vypočítaný obsah perlitu po simulaci řezání plasmou*



Jak již bylo uvedeno výše, materiál v oblasti ovlivnění vneseným teplem je směsí feritu, bainitu a perlitu. V dané oblasti je převážně zastoupen bainit a ferit, množství perlitu je v obou případech relativně malé. Množství feritu procentuálně doplňuje zbývající strukturní složení v každém místě tepelně ovlivněné oblasti. U technologie řezání plamenem na *Obrázku 33* množství feritu v pravé části přímo úměrně klesá se zvýšeným obsahem bainitu.



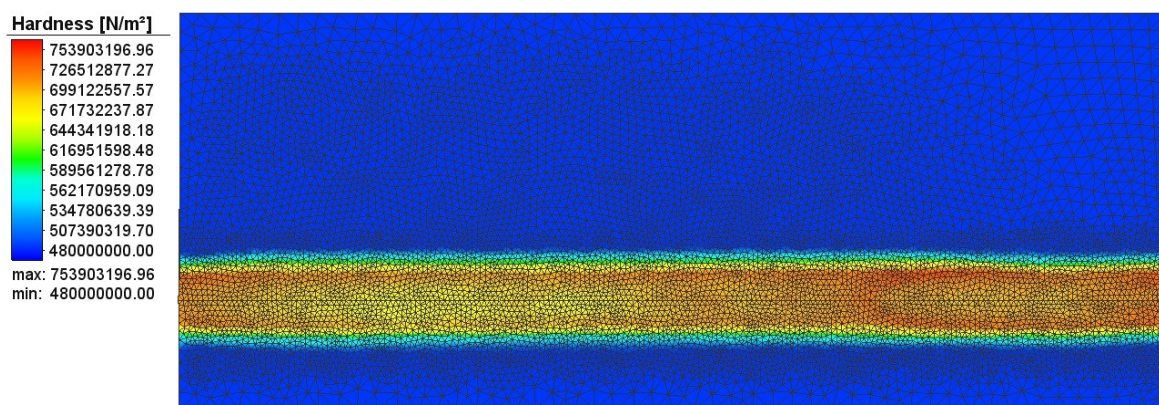
*Obrázek 33 – Vypočítaný obsah feritu po simulaci řezání plamenem*



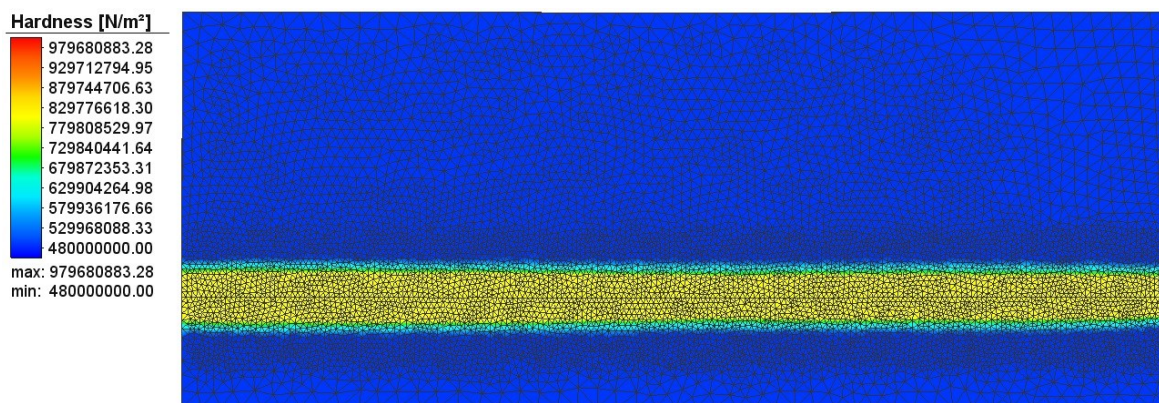
*Obrázek 34 – Vypočítaný obsah feritu po simulaci řezání plasmou*



Na *Obrázku 35* a *Obrázku 36* lze vidět získané hodnoty tvrdosti. Po simulaci řezání plasmou vykazuje oblast ovlivněná teplem vyšší tvrdost než po řezání plamenem. U řezání plasmou je nárůst tvrdosti rovnoměrněji rozložen po celé délce trajektorie svařovacího robota. Hodnoty a rozložení tvrdosti jsou závislé na obsahu bainitu, kterého je v oblasti ovlivněné teplem simulovaného řezání plasmou větší množství. Po simulaci řezání plamenem je největší nárůst tvrdosti přibližně v oblasti nacházející se v okolí poslední třetiny trajektorie svařovacího robota. Na přechodu mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem lze z důvodu výskytu perlitu pozorovat taktéž nárůst hodnoty tvrdosti. Nárůst tvrdosti v přechodové oblasti je patrný přibližně u obou technologií ve stejné míře.

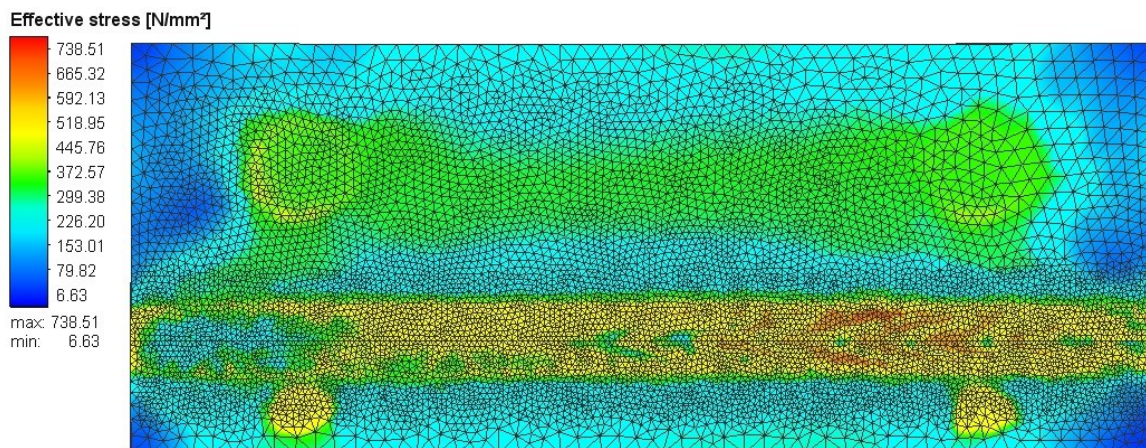


*Obrázek 35 – Vypočítaná tvrdost po simulaci řezání plamenem*

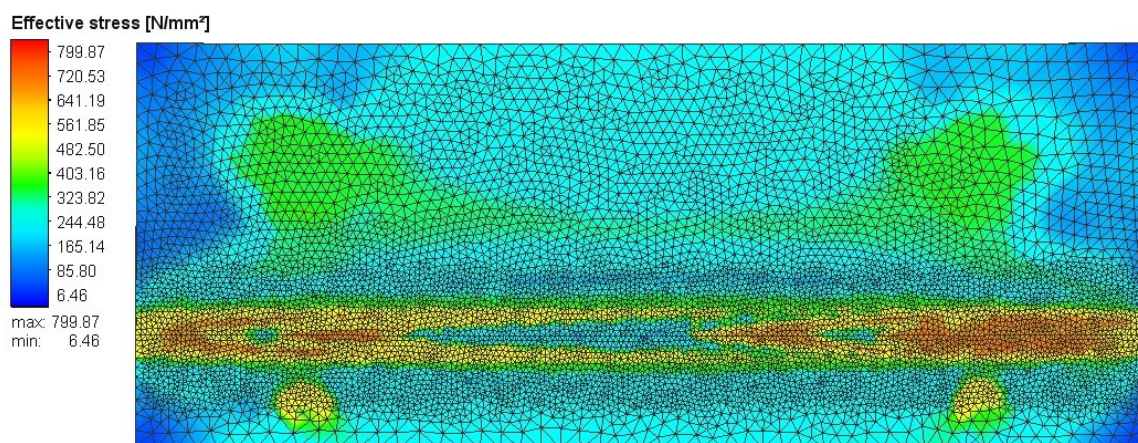


*Obrázek 36 – Vypočítaná tvrdost po simulaci řezání plasmou*





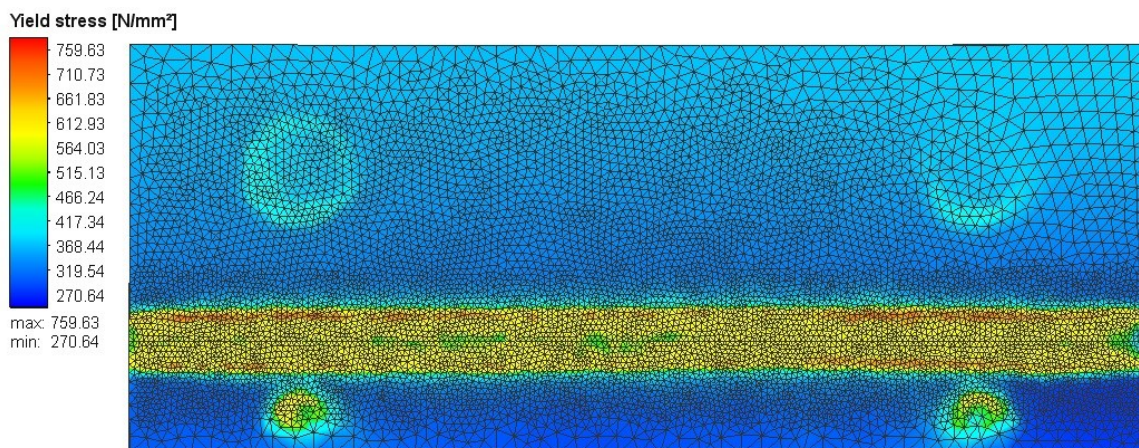
Obrázek 37 – Vypočítaná intenzita napětí po simulaci řezání plamenem



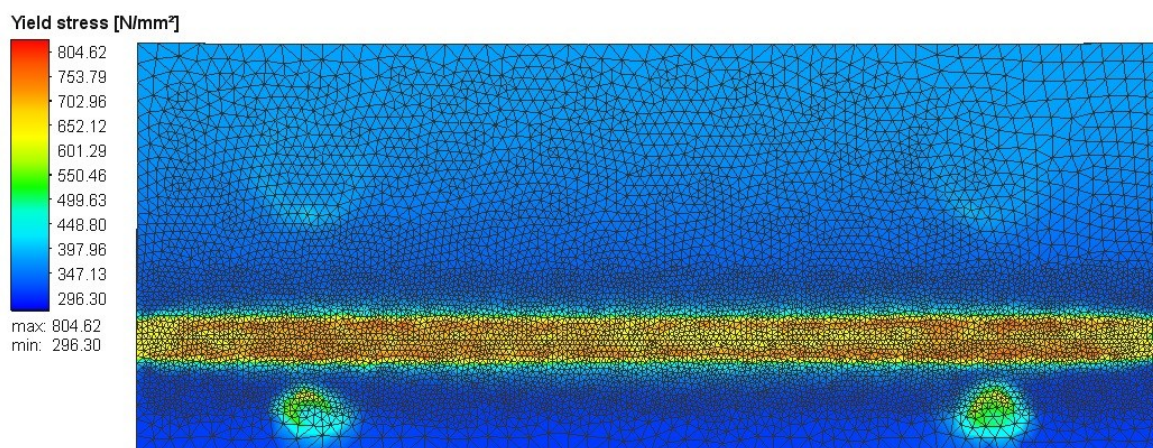
Obrázek 38 – Vypočítaná intenzita napětí po simulaci řezání plasmou

Intenzita napětí dosahuje u řezání plamenem maximální hodnoty  $738,51 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , u technologie řezání plasmou  $799,87 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Po simulaci řezání plamenem je oblast se zvýšenou hodnotou intenzity napětí výrazně širší. U plamene je rozložení výrazně zvýšených hodnot intenzity napětí rovnoměrnější po celé délce svařovací trajektorie.





Obrázek 39 – Vypočítaná mez kluzu po simulaci řezání plamenem



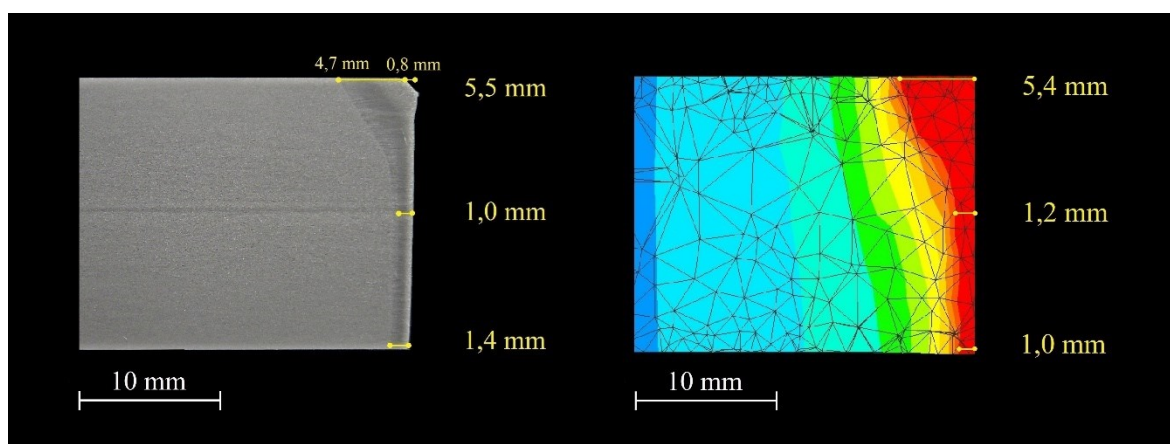
Obrázek 40 – Vypočítaná mez kluzu po simulaci řezání plasmou

Maximální hodnota meze kluzu je  $759,63 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  po simulaci řezání plamenem,  $804,62 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  po řezání plasmou. Nárůst hodnoty meze kluzu je v tepelně ovlivněné oblasti výraznější u technologie řezání plasmou.

### 3.3.4 Porovnání výsledků s experimentem

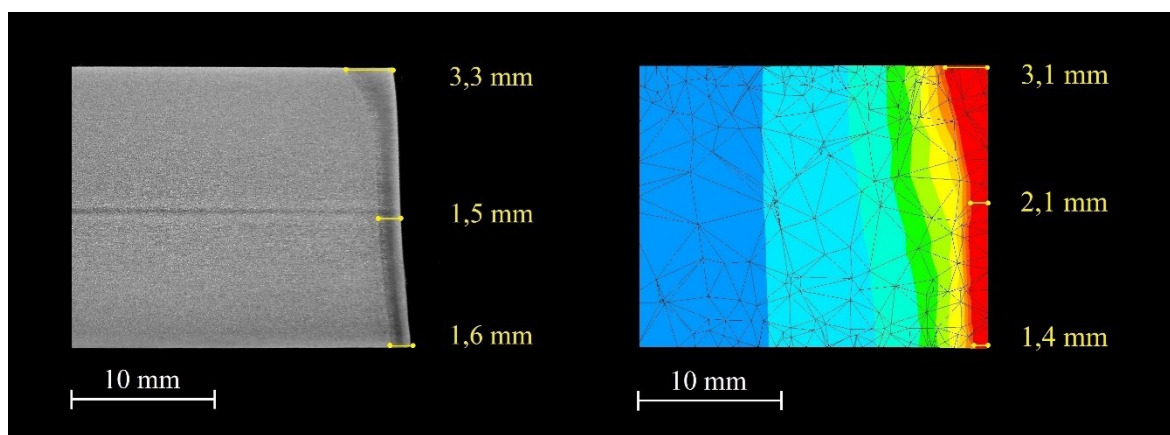
Jedním z nejdůležitějších parametrů simulací bylo správné navržení tepelného zdroje. Program Simufact Welding 8 nedisponuje možností termického dělení, tento proces byl proto za účelem simulací nahrazen procesem obloukového svařování pro simulaci řezání plamenem a procesem laserového svařování pro simulaci plasmou. Z důvodu nahrazení procesu řezání procesem svařování během simulací vzniká absence řezné spáry. Za účelem porovnání byla pro větší názornost na *Obrázku 41* a *Obrázku 42* vizuálně odstraněna polovina šířky řezné spáry ze simulovaných tepelně ovlivněných oblastí a tyto rozměry odečteny.

Po opakovaných pokusech o dosažení podobného tvaru a rozměrů tepelně ovlivněné oblasti byly pro simulaci řezání plamenem použity dva svařovací roboti působící současně, každý s odlišnými parametry tepelného zdroje. Na *Obrázku 41* je vyobrazeno porovnání tepelně ovlivněné oblasti pro řezání plamenem získané během simulace, s tepelně ovlivněnou oblastí získanou experimentálně. Tento experiment byl proveden v rámci bakalářské práce a je v ní blíže popsán. Rozšíření v horní části disponuje velmi podobným tvarem i rozměrem. Rozměry ve zbývajícím průniku materiálem se u simulace odlišují, dochází k postupnému zúžení šířky. Tato skutečnost však může být do značné míry ovlivněna kvalitou síťování. Požadovanému tvaru a rozměrům reálné tepelně ovlivněné oblasti se pro účely simulace řezání plamenem podařilo přiblížit s dostatečnou přesností.



*Obrázek 41 – Srovnání velikosti a tvaru TOO plamen, vlevo experiment, vpravo simulace*

Pro simulaci řezání plasmou byl za účelem dosažení potřebné tepelně ovlivněné oblasti použit laserový tepelný zdroj. Tepelně ovlivněná oblast vypočítaná simulací je v horní části mírně užší, rozšíření však zasahuje o něco hlouběji než u experimentu. Největší odlišnost je viditelná v polovině tloušťky materiálu, kde je šířka vypočítané tepelně ovlivněné oblasti o 0,6 mm větší. Ve spodní části tepelně ovlivněné oblasti se šířka opět téměř shoduje, vypočítaná je menší o 0,2 mm. I přes jistou odlišnost byla pro účely simulace řezání plasmou tepelně ovlivněná oblast vyhovující.



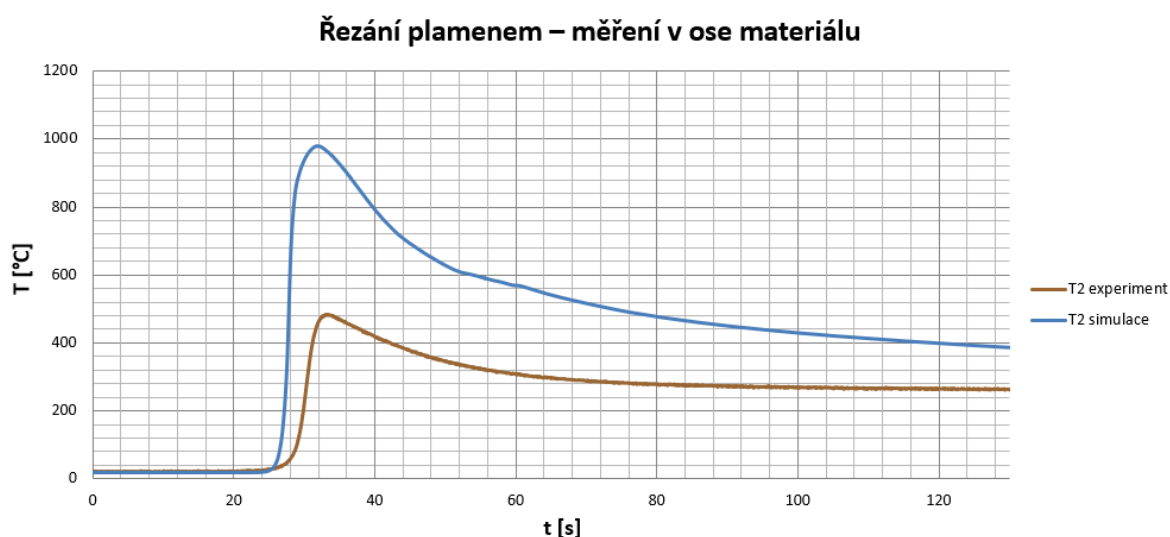
Obrázek 42 – Srovnání velikosti a tvaru TOO plasma, vlevo experiment, vpravo simulace

Teplotní cykly získané během simulace byly porovnány s experimentálně získanými. Pro každou z technologií byl vybrán jeden termočlánek umístěný v hloubce 10 mm a druhý v hloubce 5 mm od povrchu řezaného materiálu. V *Tabulce 11* jsou porovnány hodnoty teplot získané během simulace s teplotami získanými experimentálně. Maximální teploty dosahují u vypočítaných teplotních cyklů výrazně vyšších hodnot. Největší rozdíl je patrný u teplotních cyklů získaných ze simulace řezání plamenem, kde teploty dosahují přibližně dvojnásobku oproti experimentu. Největší shody bylo dosaženo u termočláneku umístěného v ose materiálu u řezání plasmou, kde rozdíl činí 92,8 °C. Největší rozdíl mezi vypočítanou a naměřenou teplotou vykazuje termočlánek umístěný 5 mm pod povrchem u řezání plamenem, kde rozdíl teplot činí 667,8 °C.

Tabulka 11 – Srovnání maximálních naměřených a vypočítaných teplot

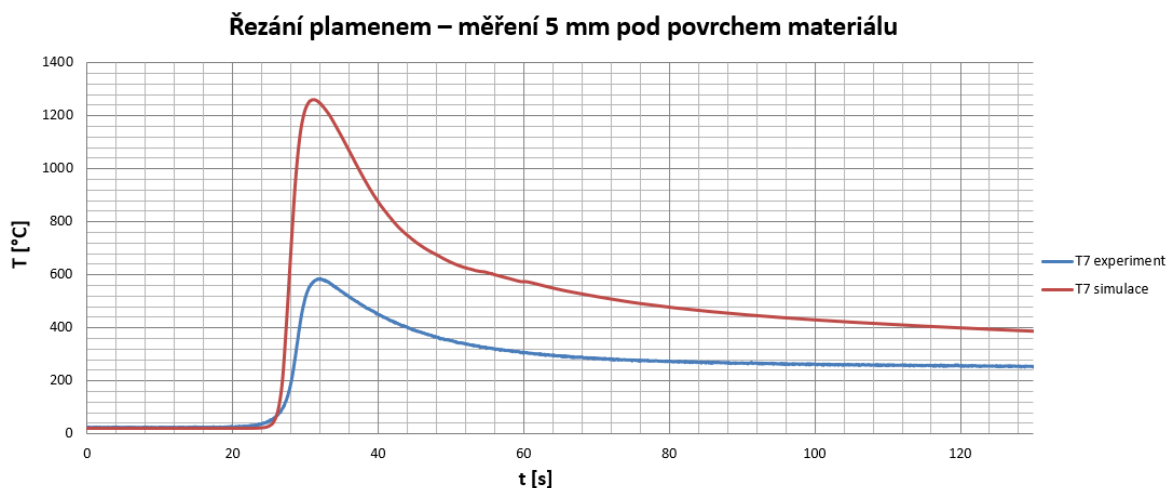
Technologie	Termočlánek	Hloubka umístění [mm]	Experiment Tmax [°C]	Simulace Tmax [°C]
Plamen	T2	10	482	978,8
	T7	5	594	1261,6
Plasma	T2	10	702	794,8
	T8	5	354	545,1

Každý z grafů zobrazuje teplotní cyklus získaný z reálného termočlánu a vypočítaný teplotní cyklus z virtuálního termočlánu umístěného ve stejné poloze vůči ose řezu. Graf 6 zobrazuje srovnání teplotních cyklů v polovině tloušťky materiálu u řezání plamenem. Vypočítaný teplotní cyklus dosahuje výrazně většího maxima, část křivky charakterizující ohřev je strmější. Rychlost ochlazování na teplotu okolí je zvláště v počáteční fázi výrazně větší než u naměřeného cyklu. To je zapříčiněno zejména ochlazováním z mnohem vyšší teploty. Teplotní cykly Grafu 7 pro řezání plamenem z termočlánu umístěných 5 mm pod povrchem vykazují stejné odlišnosti, jako v Grafu 6.



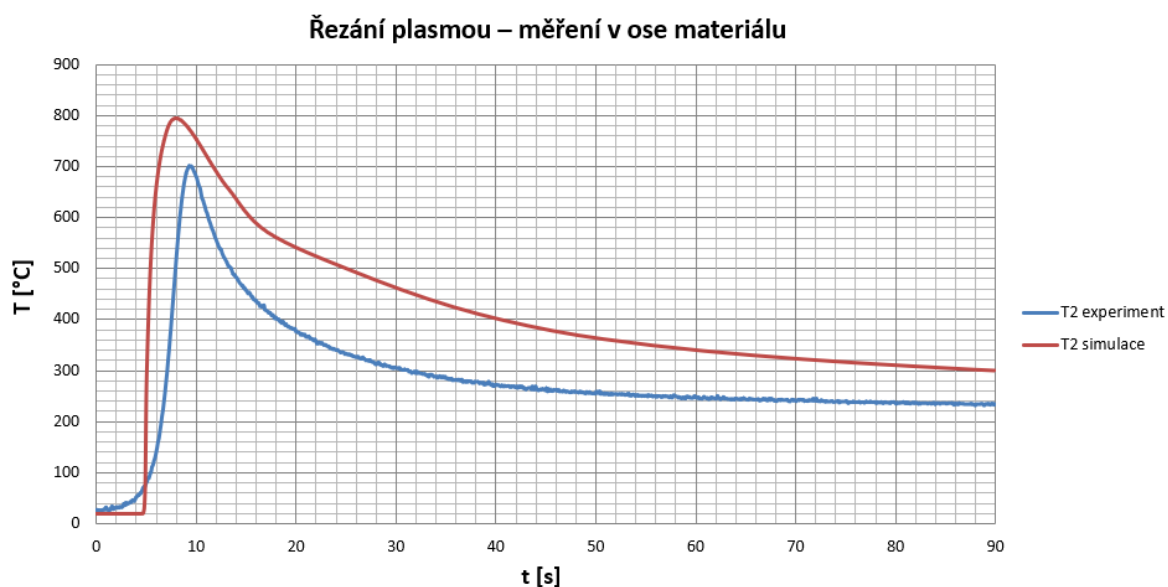
Graf 6 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plamenem s experimentem





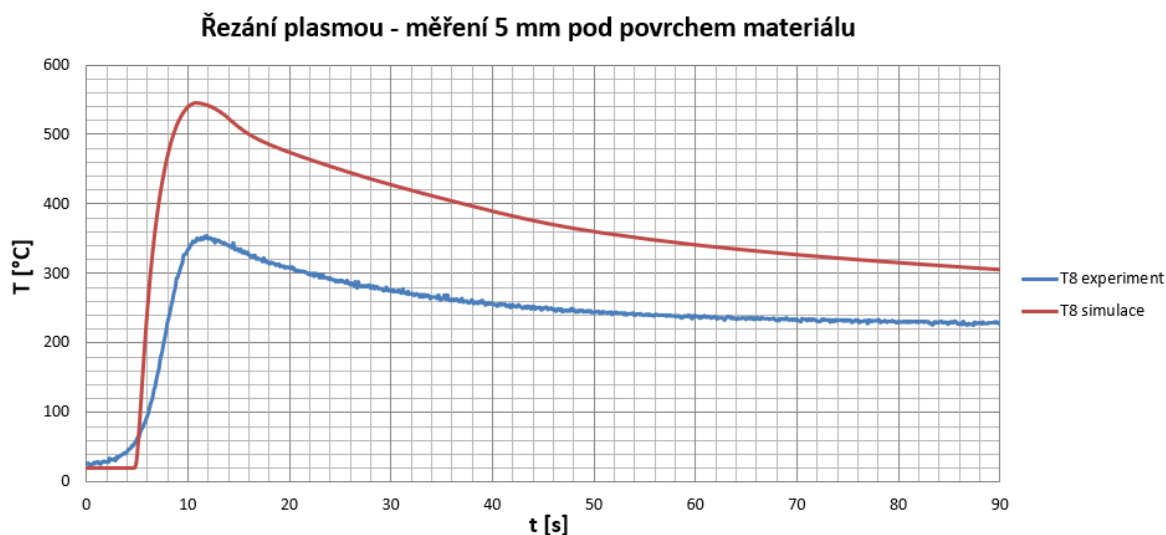
*Graf 7 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plamenem s experimentem*

Teplotní cykly u řezání plasmou vykazují mnohem větší shodu, jak již bylo zmíněno výše. V polovině tloušťky materiálu byla naměřena maximální teplota 702 °C, hodnota maximální teploty vypočítané v simulaci činí 794,8 °C. Z Grafu 8 je patrné, že u vypočítaného cyklu je počátek ohřevu z teploty okolí velmi náhlý. Křivka ohřevu má u vypočítaného teplotního cyklu strmější charakter, ohřev se při dosažení vyšší teploty zpomaluje. Křivka ohřevu u experimentálně získaného teplotního cyklu je strmá méně, její tvar je více lineární. Křivka chladnutí je u naměřeného cyklu v počáteční fázi prudší, posléze mírnější.



*Graf 8 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plasmou s experimentem*

V hloubce 5 mm pod povrchem materiálu u řezání plasmou byla naměřena maximální teplota 354 °C, vypočítaná dosáhla hodnoty 545,1 °C. Rozdíl mezi naměřenou a vypočítanou teplotou činí 191,2 °C. Křivky ohřevu vykazují stejné odlišnosti, jako u *Grafu 8*. Křivka chladnutí má strmější charakter u vypočítaného cyklu, zejména během prvních několik sekund.



*Graf 9 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plasmou s experimentem*

### 3.3.5 Diskuze dosažených výsledků

Tepelně ovlivněná oblast získaná na základě simulace řezání plamenem je podobná experimentálně získané. Rozšířená horní část vykazuje velkou tvarovou i rozměrovou podobnost. Směrem ke spodní části se tepelně ovlivněná oblast mírně zužuje, rozdíl oproti experimentu činí 0,4 mm. U simulace řezání plasmou je vypočítaná tepelně ovlivněná oblast odlišná svým rozměrem zejména v polovině tloušťky materiálu. Vypočítaný rozměr tepelně ovlivněné oblasti je o 0,6 mm širší oproti experimentu. Horní rozšířená část je ve srovnání s experimentem vyšší, šířka je velmi podobná. Dosažená podobnost tepelně ovlivněných oblastí u simulací řezání plamenem a plasmou je vzhledem k experimentu vyhovující. Rozměrové a tvarové odlišnosti mohou být do značné míry ovlivněny kvalitou síťování modelu.

Grafy vypočítaných teplotních cyklů vykazují oproti naměřeným teplotním cyklům odlišnosti. Hodnoty maximálních vypočítaných teplot jsou výrazně vyšší. U procesu řezání kyslíkem činí rozdíly v naměřených a vypočítaných maximálních teplotách 496,8 °C a 667,6 °C. Rozdíly v maximálních teplotách u řezání plasmou 92,8 °C a 191,8 °C. Tvar vypočítaných teplotních cyklů se přes drobné odlišnosti vůči cyklům naměřeným jeví jako vyhovující. Vypočítané teplotní cykly u procesu řezání plamenem nedosáhly předpokládané shody s cykly získanými experimentálně.

Uvedené rozdíly mohou být způsobeny vlivem několika faktorů. Materiál použitý z knihovny Simufact Welding 8 nemusí zcela korespondovat s materiálem použitým během experimentu. Použité parametry tepelné výměny a vedení tepla byly ponechány na přednastavených hodnotách, za účelem zpřesnění výpočtu by je bylo vhodné ověřit. Přestože byly modelové tepelné zdroje opakovaně kalibrovány, reálnému tepelnému zdroji se pouze přibližují. Negativní vliv na výsledek má také nahrazení řezné spáry během simulace svarovým kovem. Během určování skutečné polohy termočlásku pro účely simulace mohlo dojít k nepřesnostem měření. Otvory vyvrtané pro termočlásky měly průměr 3,5 mm, otvory nemusely být zcela rovnoběžné s povrchem materiálu. Vzdálenost od osy řezu se od naměřených hodnot mohla odlišovat.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo uskutečnění numerických simulací procesů termického dělení. Za pomoci programu Simufact Welding 8 byl simulován proces řezání kyslíkem a proces řezání plasmou. Numerické simulace umožňují detailnější proniknutí do problematiky, bez nutnosti realizace finančně i časově náročných experimentů. V závislosti na definovaných parametrech lze provést systematickou studii procesu a zjistit jejich vliv na konečný výsledek.

V úvodní části práce byla provedena charakteristika použitého základního materiálu, jímž je konstrukční nelegovaná ocel S355. Bylo uvedeno její chemické složení, mechanické vlastnosti, tahový diagram a ARA diagram. Následně byla uskutečněna studie technologií termického dělení, konkrétně metody řezání kyslíkem a plasmou. Byl popsán princip jejich funkce, důležité parametry a míra jejich použití. Potřebné teplo je do místa budoucího vzniku řezné spáry dodávané prostřednictvím teplotních zdrojů. U metody řezání kyslíkem je tento zdroj tvořen hořením směsi topného plynu s kyslíkem. Metoda řezání plasmou využívá k ohřevu materiálu plasmový paprsek. Další část stručně popisuje význam a podstatu numerických simulací ve svařování, včetně jejich úlohy v oblasti konstrukce a výroby. Následuje stručný popis programu Simufact Welding 8 včetně nastínění některých inovací a vylepšení dostupných oproti předcházejícím verzím.

V rámci experimentální části byl navržen a vytvořen trojrozměrný modelový spoj, sloužící k uskutečnění simulací procesů termického dělení. Modely zkušebních desek byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor Professional 2018 a následně importovány do programu Simufact Welding 8. Modely byly nasítovány pomocí modulu Simufact Mesh, který je obsahem programu Simufact Welding 8. Za účelem zvětšení přesnosti výsledku bylo vytvořeno lokální zjemnění sítě prvků v oblasti okolo uvažovaného řezu. Pro oba dva modely, sloužící k simulacím termického dělení, byl z nabídky knihovny materiálů přiřazen materiál S355J2G3MPM-sw. Volba proběhla na základě materiálu S355, jenž byl použit při experimentu uskutečněném v rámci bakalářské práce. Daný experiment poskytl vstupní data k uskutečnění numerických simulací v rámci práce diplomové. Následně byl pro každou simulaci vytvořen tepelný zdroj. Správná volba a nastavení tepelného zdroje je z hlediska výsledků simulací klíčová. Ke kalibraci rozměrů a výkonu tepelných zdrojů byly použity rozměry a tvar tepelně ovlivněných oblastí, získané z metalografické zkoušky uskutečněné během bakalářské



práce. Pro simulaci řezání kyslíkem byly z důvodu dosažení potřebné rozměrové a tvarové podobnosti použity dva svařovací roboti s odlišnými parametry tepelného zdroje. Pro simulaci této technologie termického dělení byl využit Goldakův model tepelného zdroje. K simulaci řezání plasmou byl užit jako tepelný zdroj laserový paprsek. Jelikož v programu není možné simulovat tepelné dělení, byl tento proces za účelem simulací nahrazen svařováním. Modely byly upnuty pomocí pevných svěrek. Parametry tepelné výměny byly ponechány na přednastavené hodnotě.

Po uskutečnění numerických simulací se zadanými vstupními parametry jsme získali výsledky. Výsledky jsou dostupné jako grafické náhledy či grafy a lze je generovat i v určitém průřezu a konkrétním čase. Na základě simulací byly stanoveny velikosti vypočítaných tepelně ovlivněných oblastí pro jednotlivé technologie. Pomocí sledovaných bodů, umístěných v návaznosti na skutečnou polohu termočlánek použitých v experimentální části bakalářské práce, byly vygenerovány teplotní cykly. Pro každou simulaci byly vytvořeny dva sledované body. Dále byl vypočítán obsah a rozložení strukturních složek materiálu, vznikajících díky probíhajícím fázovým přeměnám vlivem vneseného tepla. Bylo provedeno srovnání obsahu a rozložení strukturních složek v tepelně ovlivněné oblasti po ukončení simulace řezání plasmou a simulace řezání kyslíkem. Kov v oblasti ovlivněné teplem je směsí feritu, bainitu a perlitu. Perlit je obsažen poměrně v malé míře, a to zejména na přechodu tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Vlivem rychlejšího chladnutí je v tepelně ovlivněné oblasti po simulaci řezání plasmou větší obsah bainitu než je tomu u plamene.

Výsledky získané prostřednictvím numerických simulací byly porovnány s experimentem, jenž k simulacím poskytoval vstupní data. U řezání plamenem se vypočítaná tepelně ovlivněná oblast svými rozměry i tvarem pouze do malé míry odlišuje. U technologie řezání plasmou je vypočítaná tepelně ovlivněná oblast značně širší v prostřední části. Teplotní cykly získané v rámci simulace řezání plamenem dosahují přibližně dvojnásobných maximálních teplot, oproti cyklům naměřeným. Cykly vypočítané pro řezání plasmou se s naměřenými cykly shodují do větší míry. V závěrečné části byla provedena diskuse dosažených výsledků a uvažovány vlivy a okolnosti, které mohly přesnost výsledku negativně ovlivnit. Získaná data mohou v budoucnu posloužit k podrobnější studii problematiky simulací termického dělení, případně svařování. Za účelem dalšího rozvoje by bylo vhodné simulace uskutečnit za použití různých parametrů tepelných zdrojů, použitého materiálu či tloušťky.

### Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Vladislavu Ochodkovi za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 10027-1: *Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli*. Praha: Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [2] International Sheet Metal Review: *The Virtual Weld* [online]. 2014(2) [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://viewer.zmags.com/publication/f0a595ee?page=28#/f0a595ee/1>
- [3] TWI Ltd: *Oxyfuel cutting - process and fuel gases* [online]. [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/oxyfuel-cutting-process-and-fuel-gases-049>
- [4] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7.
- [5] PIEKARSKA, Wiesława, Dorota GOSZCZYŃSKA a Zbigniew SATERNUS. *Application of analytical methods for predicting the structures of steel phase transformations in welded joints. Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics* [online]. 2015, 14(2), 61-72 [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.17512/jamcm.2015.2.07. ISSN 22999965.
- [6] ELSHENNAWY, Ahmad K.; WEHEBA, Gamal S. *Manufacturing Processes & Materials*. Society of Manufacturing Engineers (SME), 2015.
- [7] *Simufact Welding 8 - New Features. Simufact Simulating Manufacturing: MSC Software Company* [online]. Hamburg [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/whats-new-in-v8.html>
- [8] Bohdan Bolzano: *Přehled vlastností oceli S355J2*. [online]. Kladno [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- [9] PIEKARSKA, Wiesława a Dorota GOSZCZYŃSKA-KRÓLISZEWSKA. *Analytical Methods of Predicting the Structure and Mechanical Properties of High Tensile Strength Steel*. Procedia Engineering [online]. 2017, 177, 92-98 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.189. ISSN 18777058.
- [10] BOC A member of Linde Group: *Facts about plasma technology and plasma cutting* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://www.boc-gas.co.nz/en/legacy/attachment?files=tcm:y435-68107,tcm:435-68107,tcm:35-68107>

- 
- [11] HGG Group: *Oxy-fuel cutting: the basics explained* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.hgg-group.com/knowledge-base/oxy-fuel-cutting-oxy-fuel-cutting-basics/>
- [12] IBEDA Solutions for gases: *Fuel gas properties* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.ibeda.com/en/autogenous-engineering/methods-and-characteristics/fuel-gas-properties>
- [13] CAMPBELL, F. C. *Joining: understanding the basics*. Materials Park, Ohio: ASM International, c2011. ISBN 978-1-61503-825-1.
- [14] RUFÉ, Philip D. *Fundamentals of manufacturing*. 3rd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2013. ISBN 978-0-87263-870-9.
- [15] *S355 European Standard Steel* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgs/staal\\_23\\_standaarden\\_s355\\_european\\_standard\\_steel.pdf](http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgs/staal_23_standaarden_s355_european_standard_steel.pdf)
- [16] DIVIŠ, Ondřej. *Měření teplotních cyklů v průběhu termického dělení*. Ostrava, 2017. Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017-06-09

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Oblast použití jednotlivých metod termického dělení .....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2 – Schématické znázornění řezání kyslíkem.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3 – Ochrana trysky hořáku v průběhu průniku materiálem .....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4 – Teplota plamene topný plyn/ kyslík .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 5 – Rychlost hoření plamene topný plyn/ kyslík .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 6 – Typy kyslíko-acetylenového plamene .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 7 – Konvenční plasmové řezání.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8 – Řezání plasmou s ochranným plynem .....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 9 – Řezání plasmou se vstřikováním vody.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 10 – Plasmové řezání pod vodou.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 11 – Faktory ovlivňující svařovací proces .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 12 – Tvorba síťování Simufact Welding 8 .....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 13 – Vylepšený systém upínání Simufact Welding 8 .....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 14 – Systém automatického polohování součástí Simufact Welding 8.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 15 – Interaktivní model a zobrazení výsledku Simufact Welding 8.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 16 – Goldakův model tepelného zdroje ze Simufact Welding 8 .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 17 – Model laserového zdroje tepla ze Simufact Welding 8 .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 18 – Nasítované desky včetně zjemnění v okolí svařovací trajektorie .....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 19 – Experimentálně získané velikosti TOO .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 20 – Poloha svařovací trajektorie ve vztahu k modelu .....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21 – Model sloužící k simulaci řezání plasmou v Simufact Welding 8 .....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 22 – Rozložení teploty v průběhu simulace procesu řezání plamenem .....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 23 – Velikost TOO získaná ze simulace řezání plamenem .....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 24 – Velikost TOO získaná ze simulace řezání plasmou.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 25 – Zastoupení strukturních složek v průběhu simulace řezání plamenem .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 26 – Obsah austenitu v průběhu simulace řezání plamenem .....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 27 – Zastoupení strukturních složek po simulaci řezání plamenem.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 28 – Zastoupení strukturních složek po simulaci řezání plasmou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 29 – Vypočítaný obsah bainitu po simulaci řezání plamenem .....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 30 – Vypočítaný obsah bainitu po simulaci řezání plasmou.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 31 – Vypočítaný obsah perlitu po simulaci řezání plamenem.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 32 – Vypočítaný obsah perlitu po simulaci řezání plasmou.....</i>	<i>45</i>

---

<i>Obrázek 33 – Vypočítaný obsah feritu po simulaci řezání plamenem.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 34 – Vypočítaný obsah feritu po simulaci řezání plasmou.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 35 – Vypočítaná tvrdost po simulaci řezání plamenem.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 36 – Vypočítaná tvrdost po simulaci řezání plasmou .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 37 – Vypočítaná intenzita napětí po simulaci řezání plamenem .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 38 – Vypočítaná intenzita napětí po simulaci řezání plasmou.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 39 – Vypočítaná mez kluzu po simulaci řezání plamenem .....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 40 – Vypočítaná mez kluzu po simulaci řezání plasmou.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 41 – Srovnání velikosti a tvaru TOO plamen.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 42 – Srovnání velikosti a tvaru TOO plasma .....</i>	<i>51</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Přídavné symboly v označení oceli</i> .....	9
<i>Tabulka 2 – Chemické složení</i> .....	10
<i>Tabulka 3 – Mez kluzu oceli S355</i> .....	11
<i>Tabulka 4 – Mez pevnosti oceli S355</i> .....	11
<i>Tabulka 5 – Chemické složení konkrétní oceli S355</i> .....	13
<i>Tabulka 6 – Doporučené kombinace plynů a jejich vliv na kvalitu řezu</i> .....	21
<i>Tabulka 7 – Srovnání hlavních fyzikálních vlastností plasmových plynů</i> .....	26
<i>Tabulka 8 – Parametry tepelných zdrojů pro simulaci řezání plamenem</i> .....	35
<i>Tabulka 9 – Parametry tepelného zdroje pro simulaci řezání plasmou</i> .....	36
<i>Tabulka 10 – Parametry tepelné výměny simulací</i> .....	38
<i>Tabulka 11 – Srovnání maximálních naměřených a vypočítaných teplot</i> .....	52

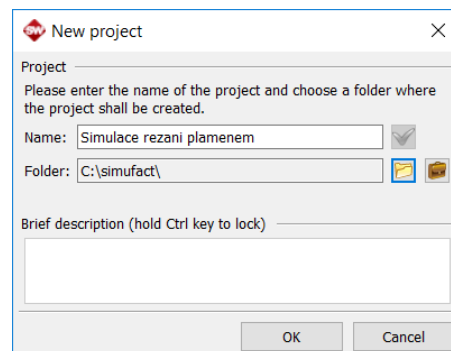
## SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 – Tahový diagram oceli S355</i> .....	12
<i>Graf 2 – ARA diagram a fázové složení oceli S355</i> .....	13
<i>Graf 3 – ARA diagram oceli S355 z knihovny materiálu Simufact Welding 8</i> .....	14
<i>Graf 4 – Teplotní cykly v průběhu simulace řezání plamenem</i> .....	41
<i>Graf 5 – Teplotní cykly v průběhu simulace řezání plasmou</i> .....	41
<i>Graf 6 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plamenem s experimentem</i> .....	52
<i>Graf 7 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plamenem s experimentem</i> .....	53
<i>Graf 8 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plasmou s experimentem</i> .....	53
<i>Graf 9 – Porovnání simulovaného teplotního cyklu řezání plasmou s experimentem</i> .....	54

## PŘÍLOHA A – VYTVOŘENÍ PROJEKTU V PROGRAMU SIMUFACT WELDING 8.0

### 1. Vytvoření nového projektu pro simulaci řezání plamenem

V horní liště klikneme na **File** → **New project**. Soubor pojmenujeme, zvolíme cílovou složku a potvrdíme **OK**.



V nastavení procesu navolíme následující:

**Process type:** *Arc Welding*

**Ambient temperature:** *20.0 °C*

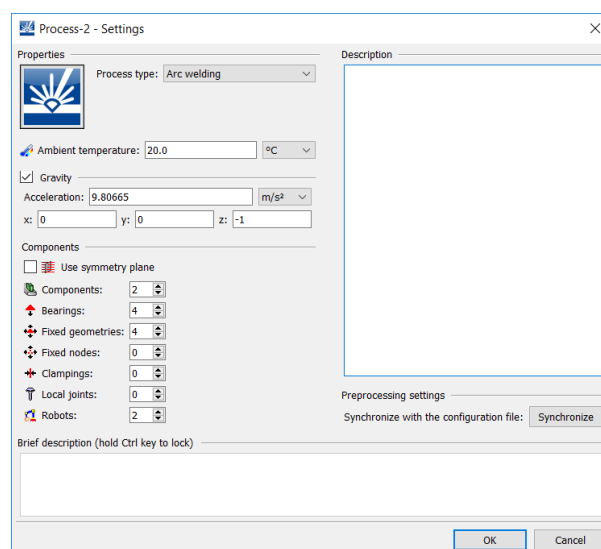
**Gravity** → **Acceleration:** *9,80665 m\*s<sup>-2</sup>, (x: 0, y: 0, z: -1)*

**Components:** *2*

**Bearings:** *4*

**Fixed geometries:** *4*

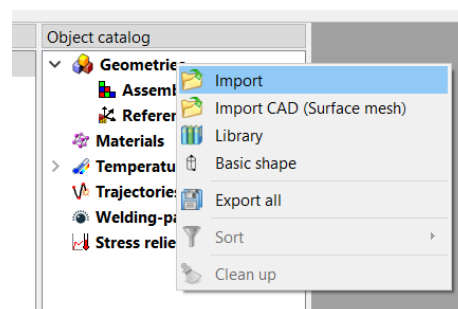
**Robots:** *2*



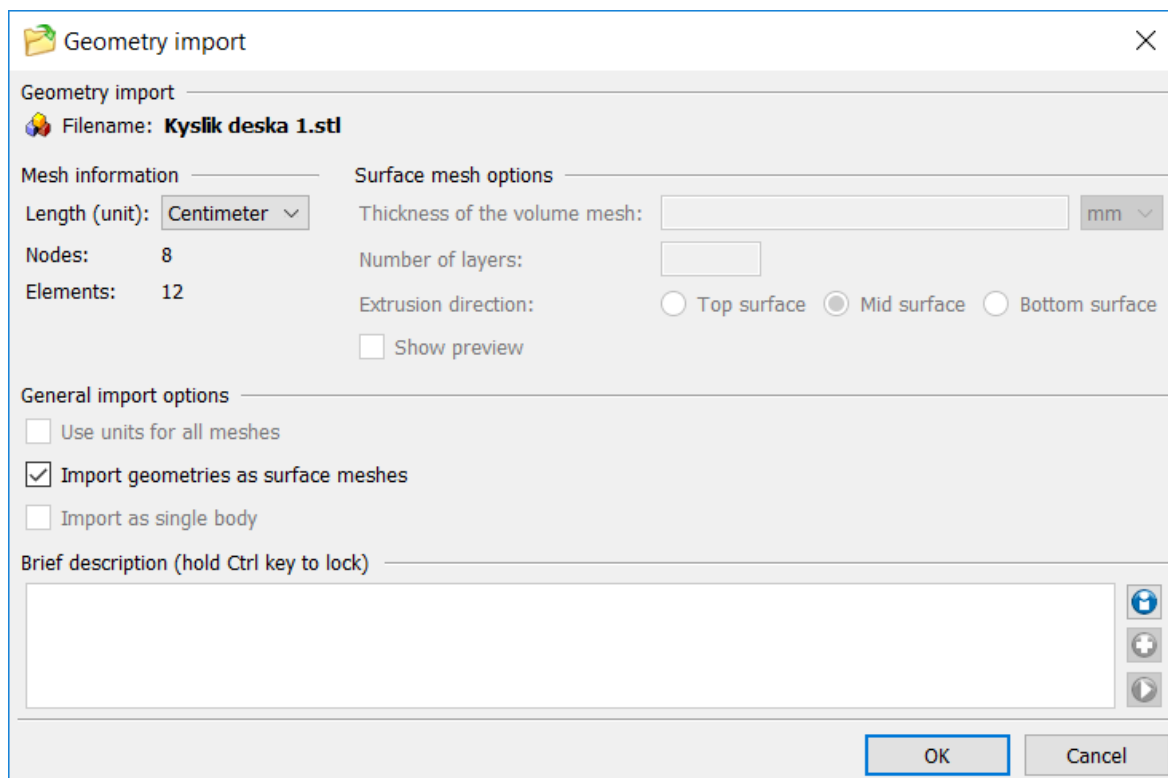
Potvrdíme kliknutím na **OK**.

### 2. Tvorba geometrie

Modely zkušebních desek byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2018. Modely musí být ve formátu STL. Modely importujeme do projektu kliknutím pravého tlačítka na **Geometries** → **Import**.





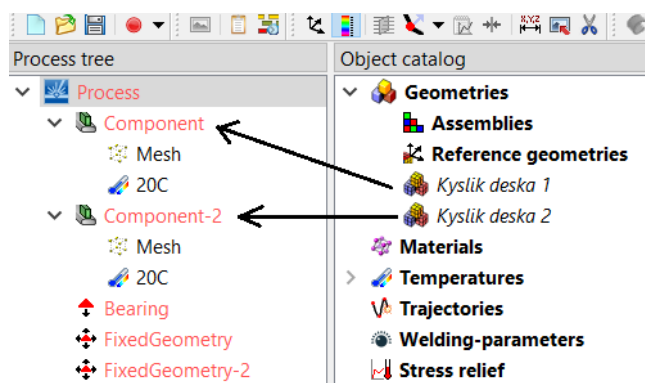


Zvolíme **Length (unit): centimetr**, zaškrtneme **Import geometries as surface** → **OK**

Import provedeme totožným způsobem i pro druhou desku modelu. Přetáhneme první i druhou desku z katalogu objektu do procesního stromu,

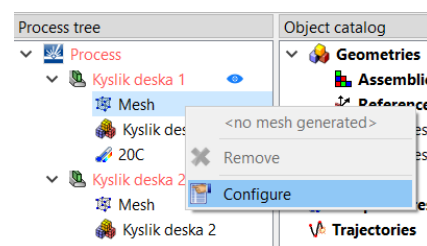
**Kyslik deska 1** → **Compoment**

**Kyslik deska 2** → **Compoment 2**



### 3. Tvorba síťování

V procesním stromu rozklikneme **Kyslik deska 1** a klikneme pravým tlačítkem **Mesh** → **Configure**.



V záložce **Mesh properties** zvolíme:

**Origin of mesh:** *Create mesh with current mesher*

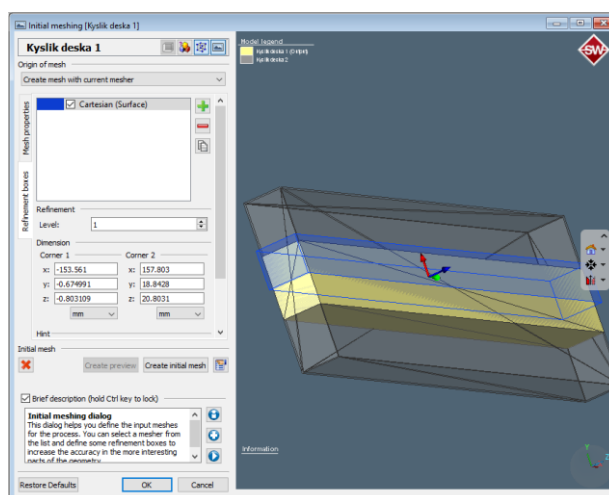
**Mesher:** *Tetmesh*

**Element type:** *Tetrahedral 134*

**Element size:** *6 mm*

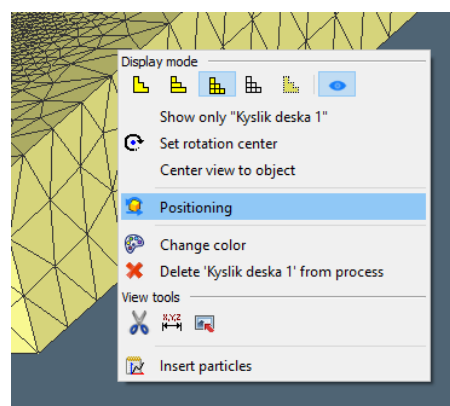
**Element edge size minimum:** *0,5 mm*

Překlikneme na záložku **Refinement boxes**. Za účelem zjemnění sítě v oblasti svaru klikneme na zelenou ikonku plus **Add new refinement box** → **Cartesian (surface)** a nastavíme myší modré pole na požadovanou velikost a do požadované polohy, nastavíme **Refinement > Level: 2**. Pomocí tlačítka **Create initial mesh** vytvoříme model sítě prvků. Vzniklou síť potvrdíme **OK**. Stejný postup opakujeme také pro druhou desku.



#### 4. Volba polohy součástí modelu

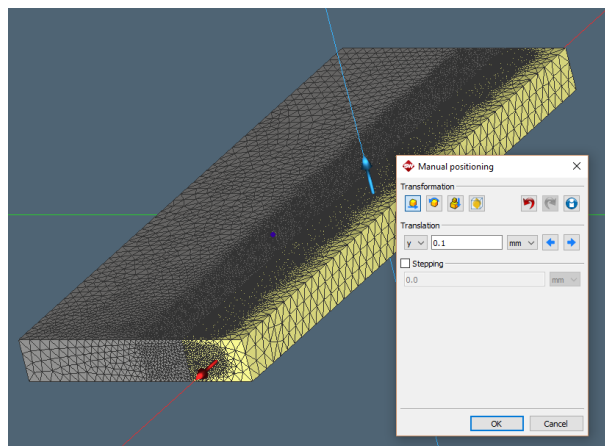
Klikneme pravým tlačítkem **Process** → **Model View**. Kliknutím levého tlačítka myši označíme jednu z desek, pravé tlačítko myši **Positioning**.



**Zvolíme:**

**Transformation: Translate**

**Translation** přepneme na osu **y**, nastavíme velikost kroku 0,5 mm a pomocí šipek nastavíme obě desky do požadované polohy, **OK**.



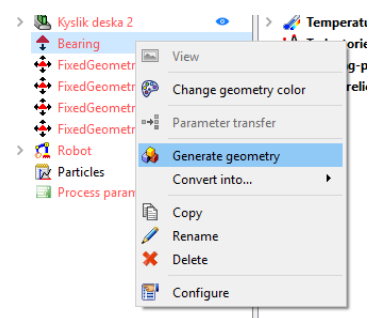
## 5. Volba upnutí

Klikneme pravým tlačítkem **Bearing** → **Generate geometry**.

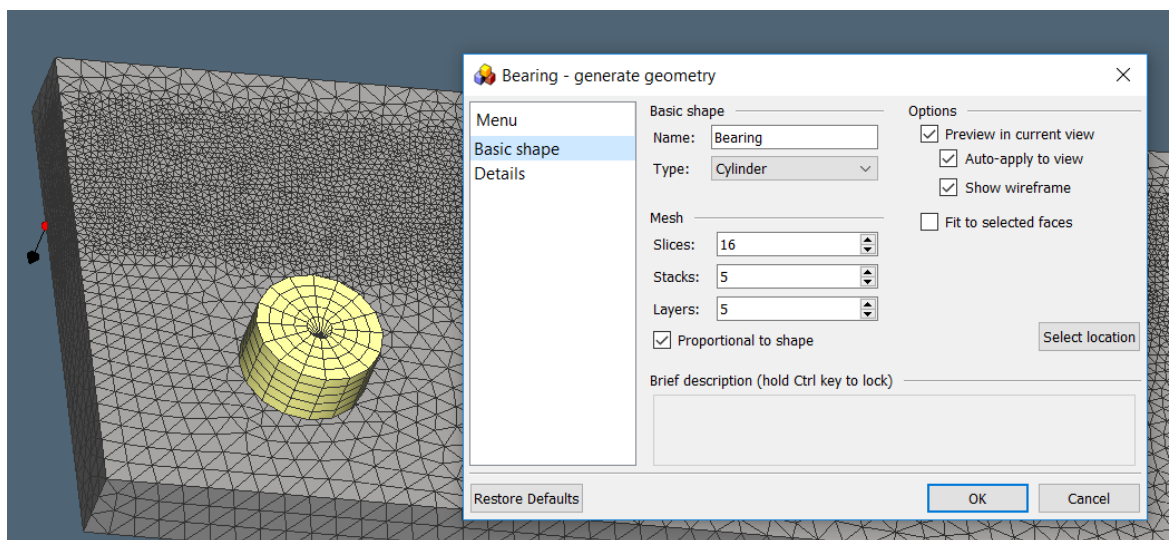
**Zvolíme:**

**Name:** Bearing

**Type:** Cylinder



Zaškrtneme **Preview in current view**; **Auto apply to view**; **Show Wireframe**. Položku **Fit to selected faces** ponecháme neaktivní.



Klikneme na tlačítko **Select location** a pomocí myši umístíme a vytvoříme válec, symbolizující pevnou podložku, na model.

**Nastavíme:**

***x:*** 100 mm

***y:*** 50 mm

***z:*** 0 mm

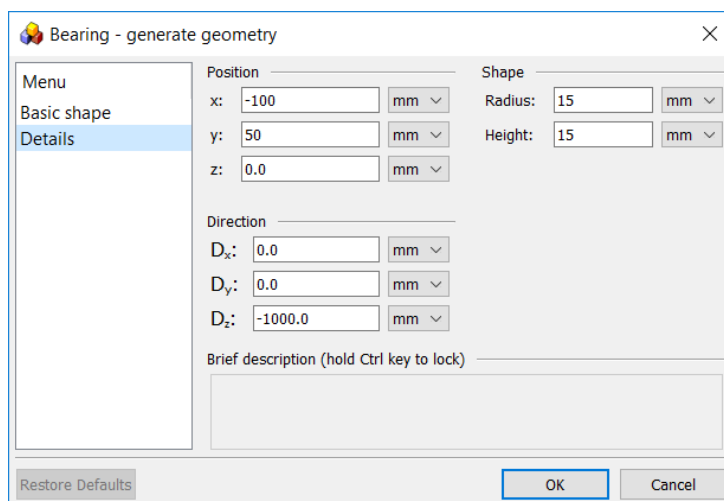
***Radius:*** 15 mm

***Height:*** 15 mm

***D<sub>x</sub>:*** 0 mm

***D<sub>y</sub>:*** 0 mm

***D<sub>z</sub>:*** -1000 mm



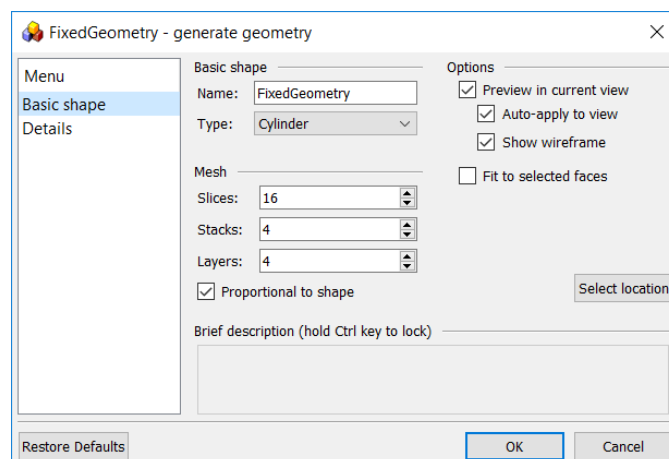
Volbu potvrdíme tlačítkem **OK**. Totožným způsobem, pouze s jinými souřadnicemi vytvoříme **Bearing 2**, **Bearing 3** a **Bearing 4**.

Naproti každému **Bearing** vytvoříme pevnou svěrku totožné velikosti. Klikneme pravým tlačítkem **Fixed geometry** → **Generate geometry** → **Select location**. Upínku napožadovaném místě modelu vytvoříme pomocí myši.

**Zvolíme:**

**Name:** Fixed geometry

**Type:** Cylinder



Zaškrtneme **Preview in current view**; **Auto apply to view**; **Show Wireframe**. Položku **Fit to selected faces** ponecháme neaktivní.

**Nastavíme:**

**$x$ :** -100 mm

**$y$ :** -22 mm

**$z$ :** 20 mm

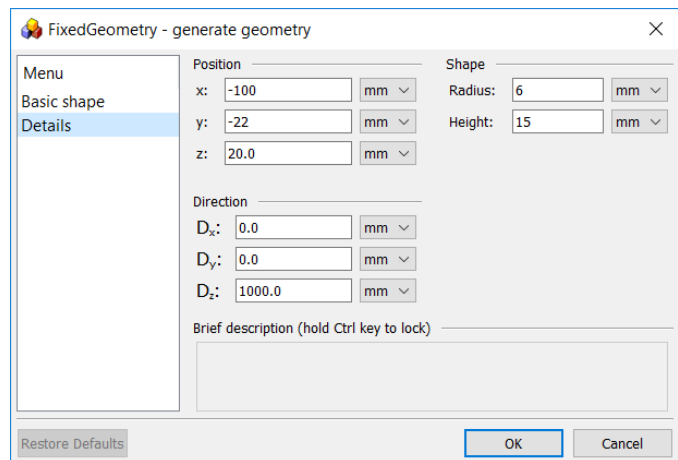
**Radius:** 6 mm

**Height:** 15 mm

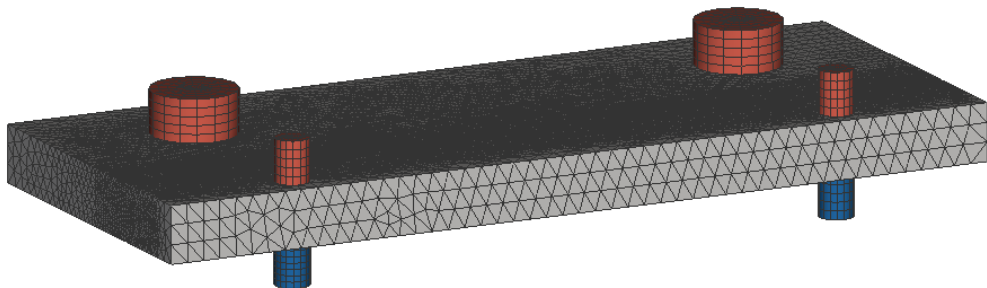
**$D_x$ :** 0 mm

**$D_y$ :** 0 mm

**$D_z$ :** 1000 mm

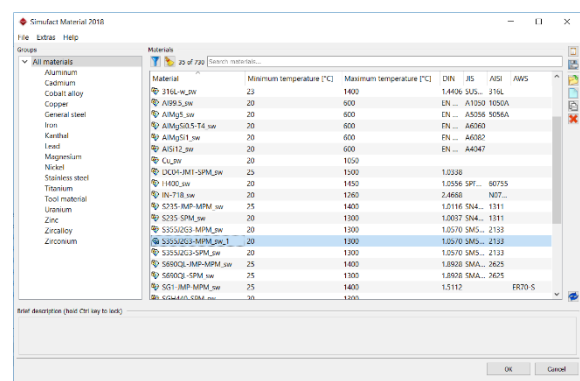
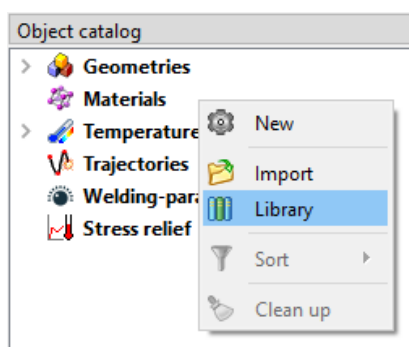


Pomoci stejného postupu vytvoříme **Fixed Geometry 2**, **Fixed Geometry 3**, **Fixed Geometry 4**. U větší desky volíme menší průměr upínacích komponentů 15 mm.

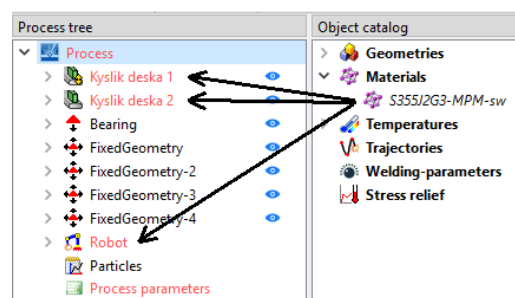


## 6. Volba materiálu:

Pravé tlačítko myši **Materials** → **Library** → **S355J2G3-MPM\_sw** → **Ok**.

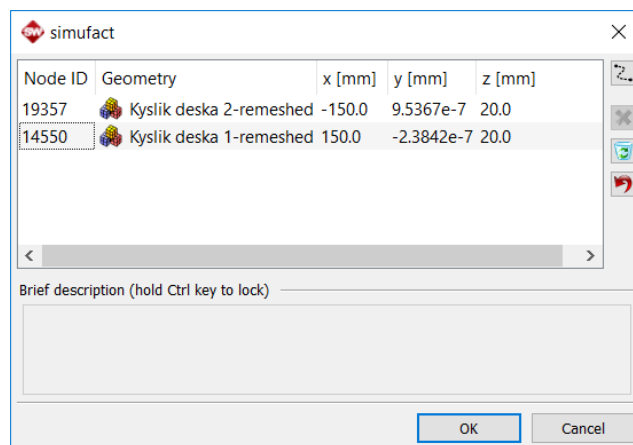
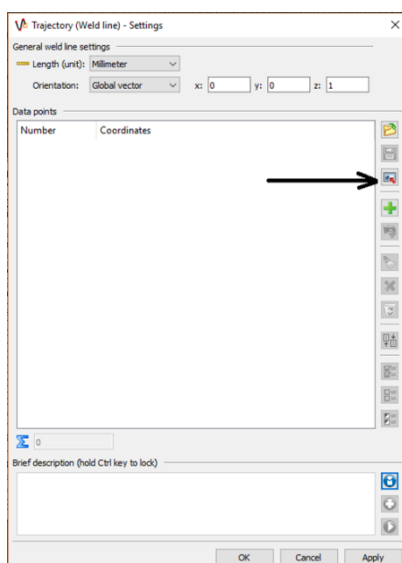
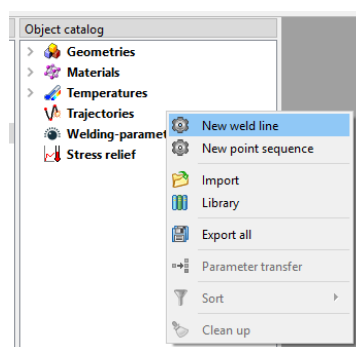


Materiál přetáhneme do robota a do obou desek v procesovém stromu.

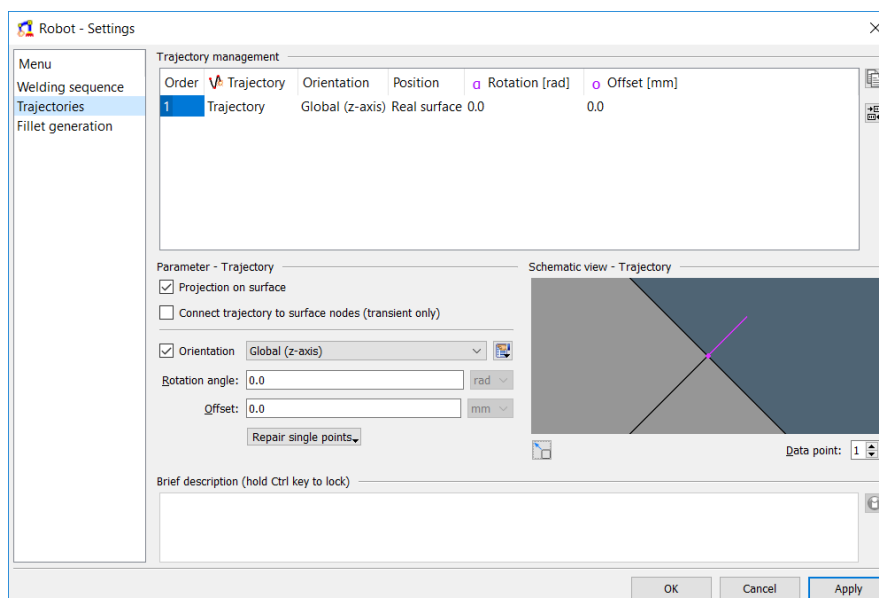


## 7. Volba trajektorie

Pravé tlačítko myši *Welding parameters* → *New weld line* → *Select nodes from process components*. V modelu klikneme na počáteční a koncový bod trajektorie (v případě potřeby další body) → *OK*.



Vzniklou trajektorii přetáhneme do svařovacího robota. Trajektorii zkopírujeme a přetáhneme do druhého svařovacího robota. Následně levým tlačítkem myši rozklikneme svařovacího robota *Robot* → *Trajectories*. Zaškrtneme *Projection on surface*. Zaškrtneme *Orientation* a přenastavíme na *Global (z axis)* → *Apply* → *OK*.



## 8. Vytvoření tepelného zdroje pro řezání kyslíkem

Z důvodu dosažení tvaru a rozměrů TOO získaného v rámci experimentální části bakalářské práce byli pro technologii řezání plamenem použity dva tepelné zdroje.

Pravé tlačítko myši *Welding parameters* → *New heat source parameters*.

**Nastavíme:**

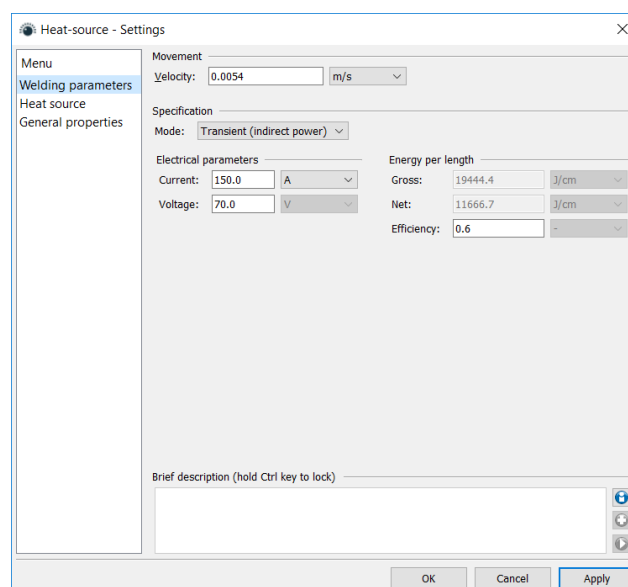
**Velocity: 0,0054 m/s**

**Mode: Transient (indirect power)**

**Current: 150 A**

**Voltage: 70 V**

**Efficiency: 0,6**



**Nastavíme:**

**Welding process:** *Conventional*

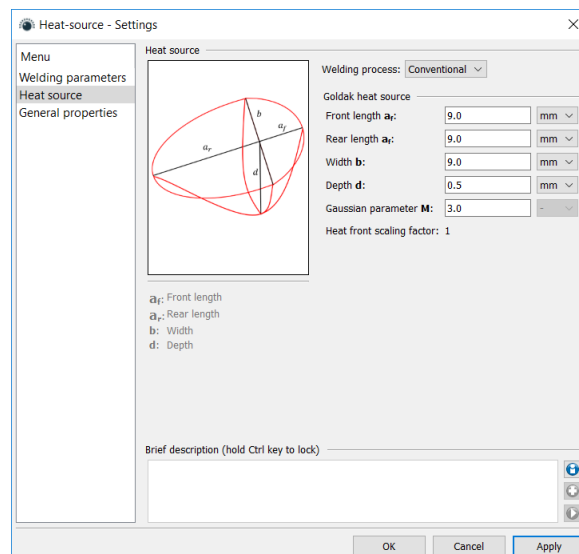
**Front lenght  $a_f$ :** *9 mm*

**Rear lenght  $a_r$ :** *9 mm*

**Width:** *9 mm*

**Depth:** *0,5 mm*

**Gaussian parameter  $M$ :** *3*



Vytvoříme druhý tepelný zdroj, pravé tlačítko myši

**Welding parameters** → **New heat source parameters.**

**Nastavíme:**

**Velocity:** *0,0054 m/s*

**Mode:** *Transient (indirect power)*

**Current:** *250 A*

**Voltage:** *70 V*

**Efficiency:** *0,6*

**Welding process:** *Conventional*

**Front lenght  $a_f$ :** *2 mm*

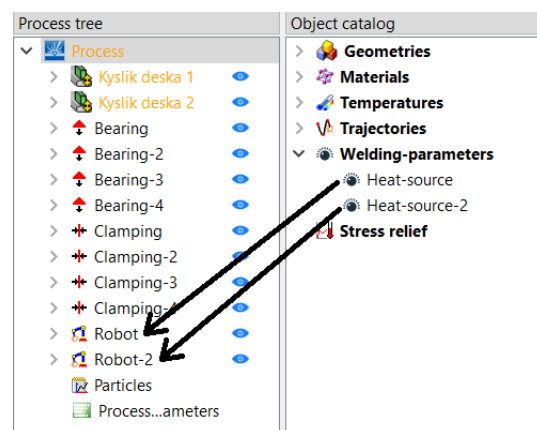
**Rear lenght  $a_r$ :** *2 mm*

**Width:** *2 mm*

**Depth:** *150 mm*

**Gaussian parameter  $M$ :** *3*

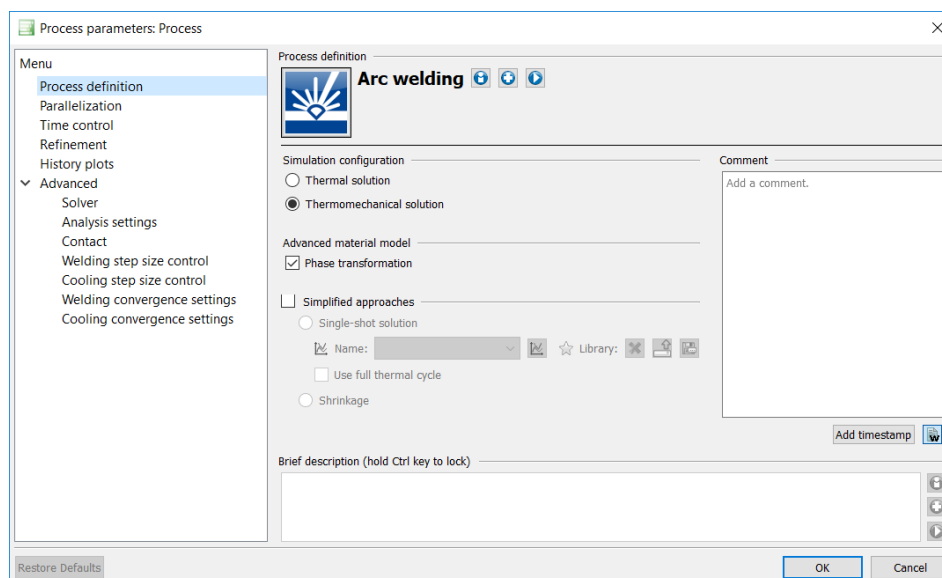
Vytvořené tepelné zdroje přetáhneme do svařovacích robotů ve stromu procesu.





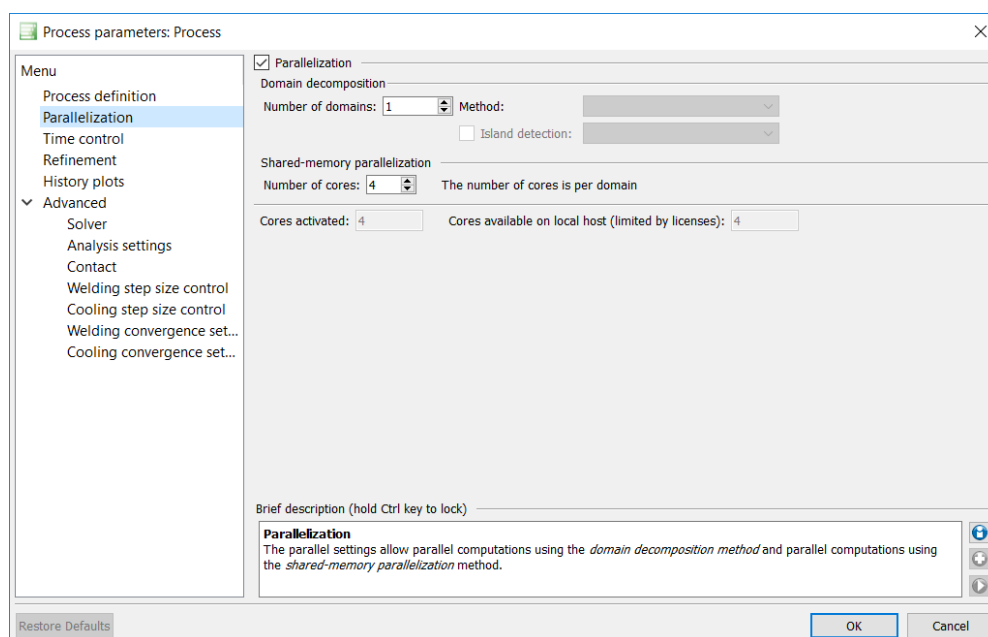
## 9. Nastavení procesních parametrů

Klikneme pravým tlačítkem **Process parameters** → **Configure**. V kartě **Process definition** zaškrtneme **Thermomechanical solution a Phase transformation**



V kartě **Parallelization** zaškrtneme **Parallelization**.

Nastavíme **Numbers of domains: 1** a **Number of cores: 4**.



## 10. Nastavení počáteční struktury materiálu

Klikneme pravým tlačítkem myši

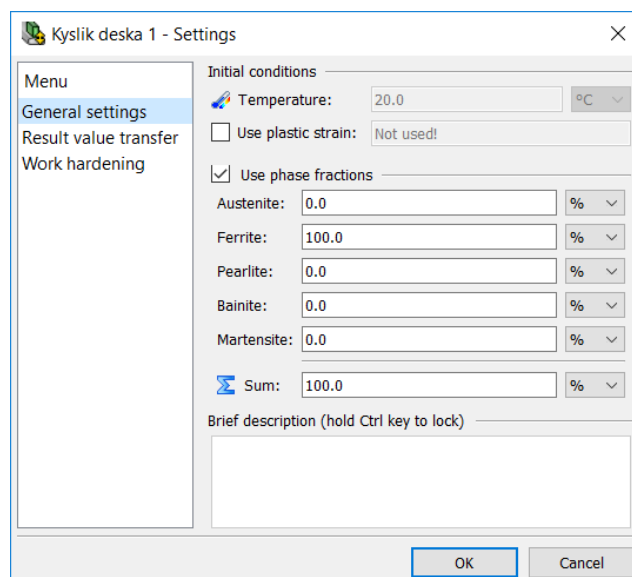
***Kyslík deska 1 → Configure***

V listu ***General Settings*** zaškrtneme

***Use phase fractions*** a nastavíme:

***Ferrite: 100 %***

Potvrdíme tlačítkem OK

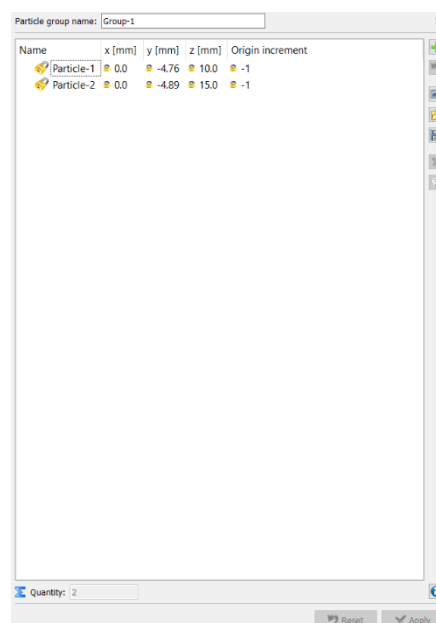


## 11. Vytvoření sledovaných bodů

Pravé tlačítko myši ***Particles → Insert particles → Add a new particle***

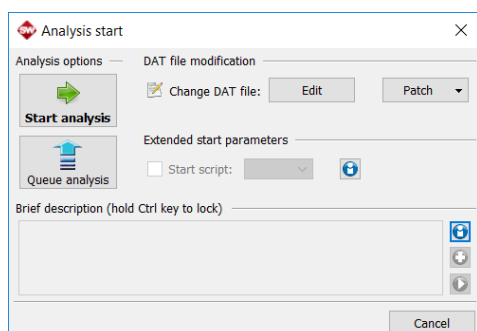
***Particle 1: x=0; y=-4,76; z=10***

***Particle 2: x=0; y=-4,89; z=15***



## 12. Spuštění simulace

***Start analysis → Save → Start analysis***



## 1. Vytvoření projektu pro simulaci řezání plasmou

Na rozdíl od simulace řezání plamenem, je v projektu pro potřeby této simulace vytvořen pouze jeden svařovací robot. Tvorba síťování, polohování desek, volba upnutí, volba materiálu, svařovací trajektorie a procesních parametrů je totožná. Zcela odlišný je však **tepelný zdroj**. Spuštění simulace je stejné.

## 2. Tvorba tepelného zdroje pro řezání plasmou

Pravé tlačítko myši *Welding parameters* → *New heat source parameters*.

**Nastavíme:**

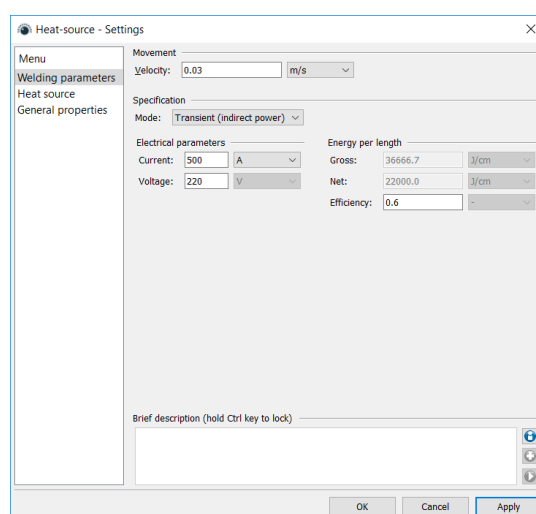
**Velocity: 0,03 m/s**

**Mode: Transient (indirect power)**

**Current: 500 A**

**Voltage: 220 V**

**Efficiency: 0,6**



**Nastavíme:**

**Welding process: laser**

**Conical heat source upper radius  $r_u$ : 1,4 mm**

**Conical heat source lower radius  $r_l$ : 1,2 mm**

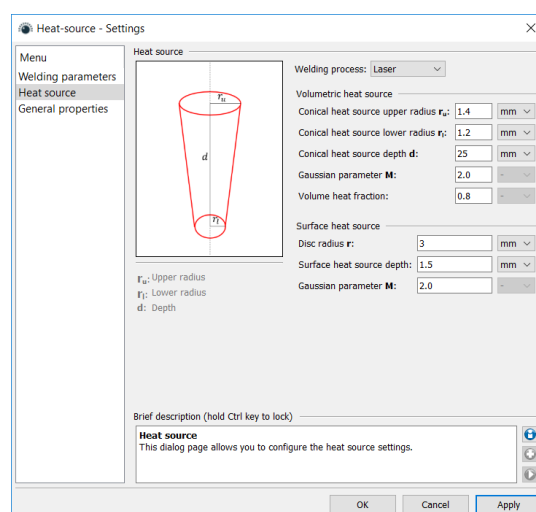
**Conical heat source depth  $d$ : 25 mm**

**Gaussian parameter  $M$ : 2**

**Disc radius  $r$ : 3**

**Surface heat source depth: 1,5 mm**

**Gaussian parameter  $M$ : 2 mm**

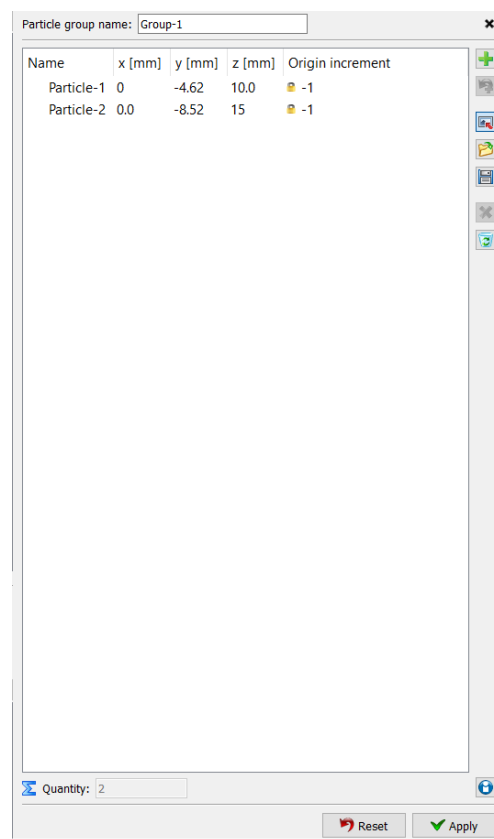


### 3. Vytvoření sledovaných bodů pro simulaci řezání plasmou

Pravé tlačítko myši **Particles** → *Insert particles* → *Add a new particle*

**Particle 1:**  $x=0$ ;  $y=-4,62$ ;  $z=10$

**Particle 2:**  $x=0$ ;  $y=-8,52$ ;  $z=15$



---

## **PŘÍLOHA B – MATERIÁLOVÝ LIST Z KNIHOVNY SIMUFACT WELDING 8.0**

### **Obecné vlastnosti:**

- DIN: 1.0570
- JIS: SM520C
- AISI: 2133
- Oblast použití: Svařování
- Skupina: Konstrukční ocel
- Zdroj: Simufact
- Vytvořeno: J. Sakkiettibutra

### **Rozsah:**

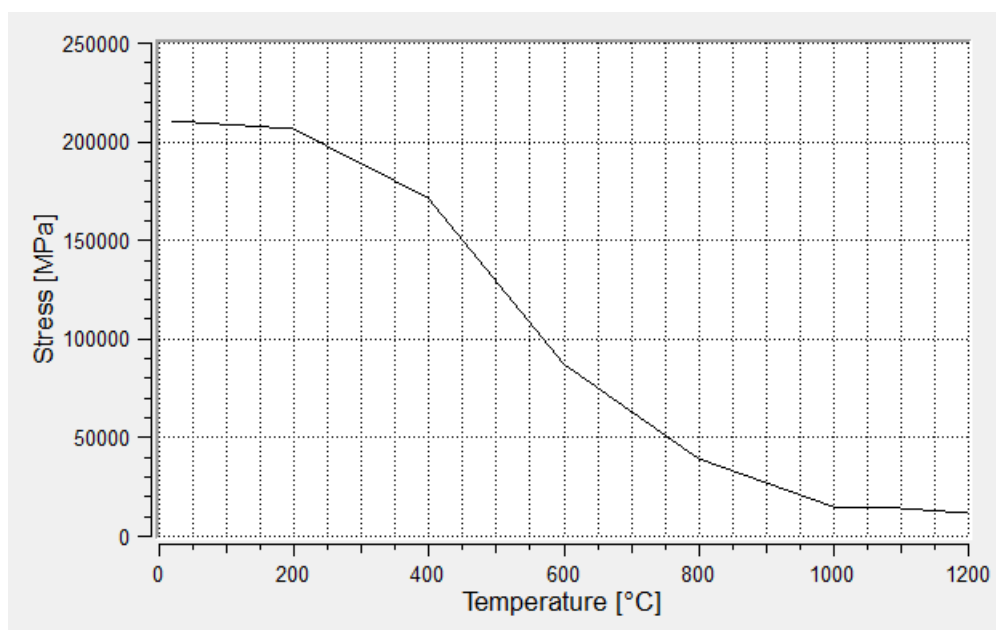
- Minimální teplota: 20.0 °C
- Maximální teplota: 1300.0 °C
- Minimální efektivní plastická deformace: 0.0
- Maximální efektivní plastická deformace: 1.0
- Minimální rychlost deformace: 0.005 1/s
- Maximální rychlost deformace: 0.005 1/s

## Chemické složení

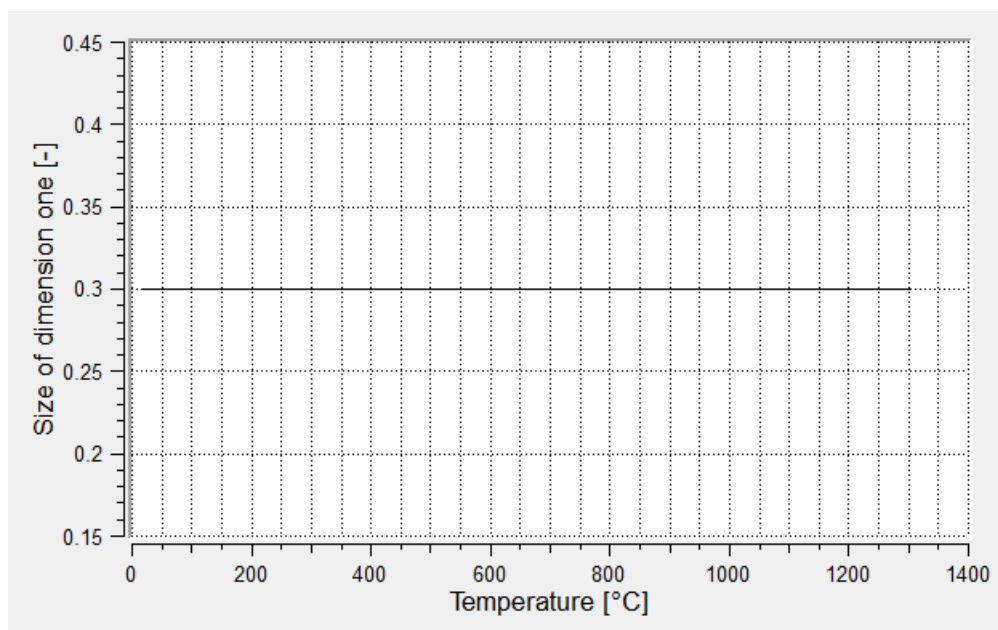
Tabulka 12 – Chemické složení

Prvek	Min	Max	Fix
Al	0	0	0,05
C	0	0	0.17
Fe	0	0	98.127
Mn	0	0	1.6
N	0	0	0.005
P	0	0	0,017
S	0	0	0,011
Si	0	0	0,02

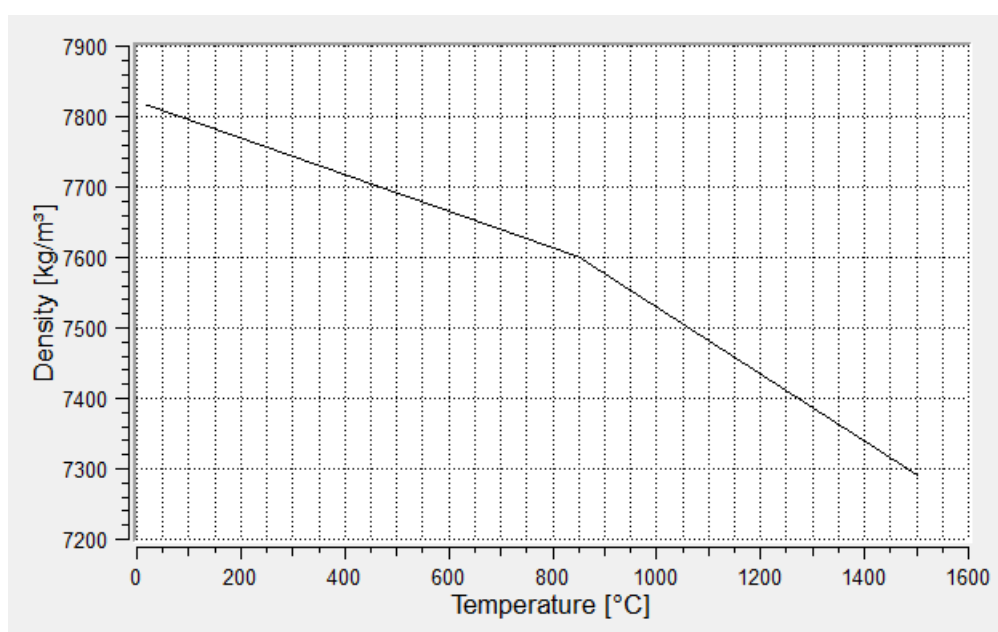
## Mechanické vlastnosti



Graf 10 – Youngův modul

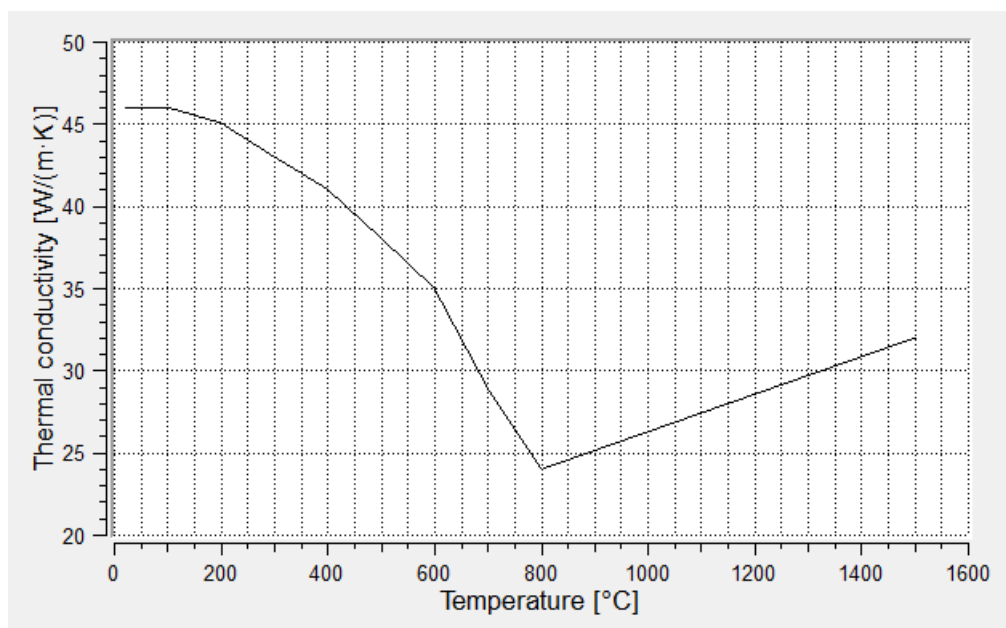


*Graf 11 – Poissonova konstanta*

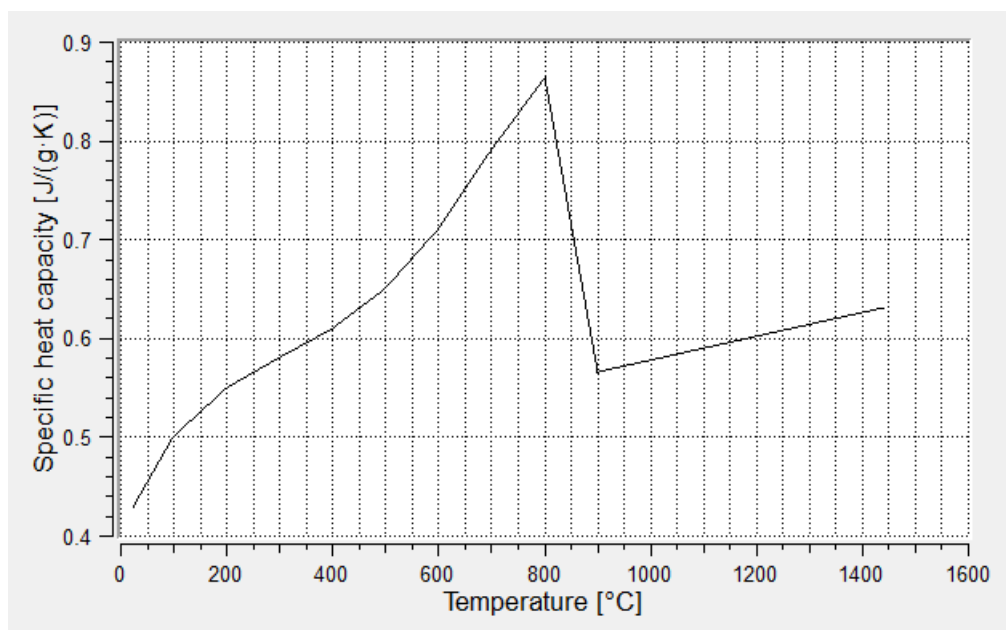


*Graf 12 – Hustota*

## Tepelné vlastnosti



Graf 13 – Tepelná vodivost

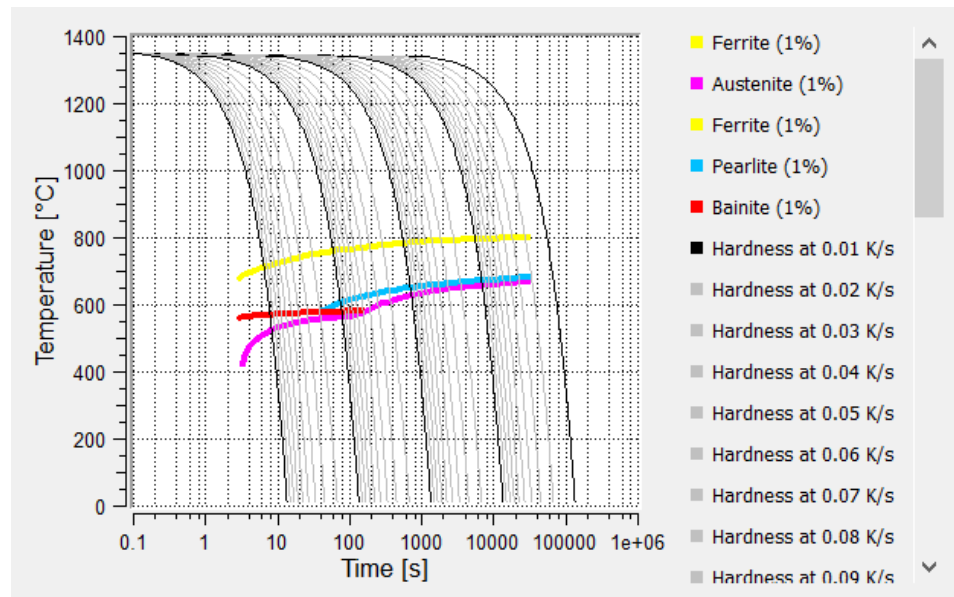


Graf 14 – Specifická tepelná kapacita



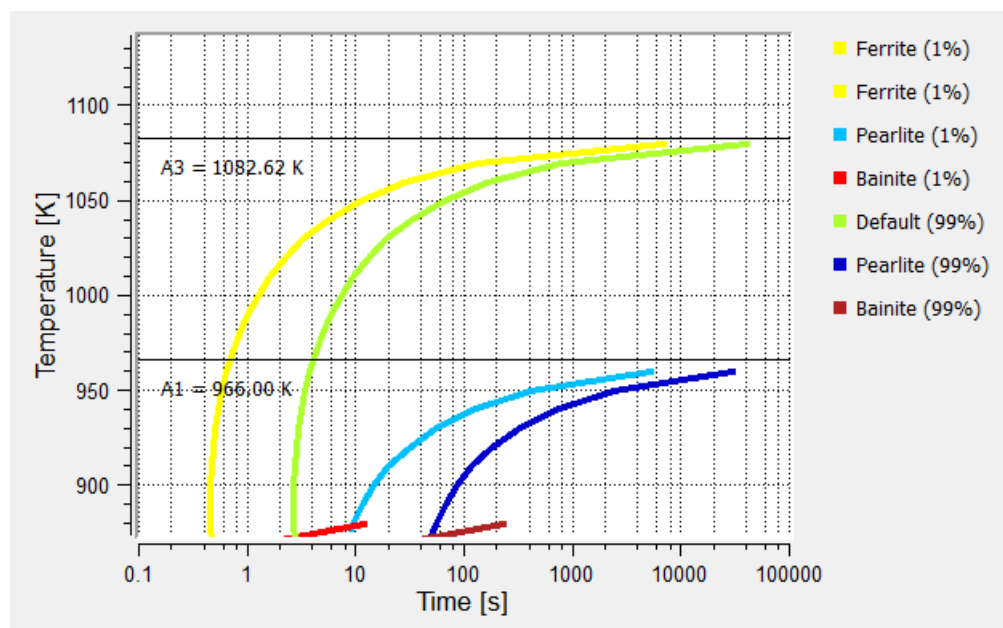


## Fázové transformace



Graf 16 – ARA diagram

- IRA diagram



Graf 17 – IRA diagram

## PŘÍLOHA C – MATERIÁLOVÝ LIST S355J2

Přehled vlastností oceli S355J2							1.0577		
Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel								
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005								
Dřívější označení	S355J2G4 podle EN 10025: 1990 +A1: 1993; St 52-3 N podle DIN 17100; 11 503 podle ČSN								
Chemické složení v % hmot. ( rozbor tavby )	C max. pro tloušťku v mm			Mn	Si	P	S	N	
	≤ 16	>16≤40	>40 <sup>1)</sup>	max.	max.	max.	max.	max.	
	0,20 <sup>2)</sup>	0,20 <sup>4)</sup>	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-	
Složení hotového výrobku	0,23 <sup>5)</sup>	0,23 <sup>4)</sup>	0,24	1,70	0,60	0,035	0,035	-	
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru	Minimální mez kluzu R <sub>eH</sub> MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :								
	≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤80	>80≤100	>100≤150	>150≤200	>200≤250	
	355	345	335	325	315	295	285	275	
	Pevnost v tahu R <sub>m</sub> MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :								
	≥3 ≤ 100			> 100 ≤ 150		> 150 ≤ 250			
	470-630			450-600		450-600			
	Minimální tažnost v % ( L <sub>0</sub> = 5.65√S <sub>0</sub> ) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm v <sup>6)</sup> :								
	≥ 3 ≤ 40		> 40 ≤ 63		> 63 ≤ 100		> 100 ≤ 150		> 150 ≤ 250
	22		21		20		18		17
	Minimální nárazová práce KV ( J ) při - 20°C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm <sup>4), 6)</sup> :								
≤ 150				>150 ≤ 250					
27 <sup>6)</sup>				27 <sup>6)</sup>					
Maximální hodnota CEV <sup>3)</sup>	Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:								
	≤ 30		> 30 ≤ 40		> 40 ≤ 150		> 150 ≤ 250		
	0,45		0,47		0,47		0,49 <sup>7)</sup>		
Technologické vlastnosti									
Svařitelnost	Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení, stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 ( EN 1011 ).								
Tváření za tepla	Jsou-li dodané výrobky dále tvářené za tepla, splňují uvedené mechanické hodnoty pouze po následném normalizačním žhání.								
Tvařitelnost za studena	Ocel určená pro tváření za studena musí být označena písmenem C ( S355JOC ). To se týká i tažení za studena.								

<sup>1)</sup> pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě.

<sup>2)</sup> pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm je hodnoty nutno dohodnout

<sup>3)</sup> hodnota uhlíkového ekvivalentu CEV, stanovená z rozboru tavby se vypočte podle vzorce :  
CEV = C + Mn : 6 + ( Cr+Mo+V ) : 5 + ( Ni+Cu ) : 15  
CEV je volitelný požadavek.

<sup>4)</sup> pro jmenovitou tloušťku nad 30 mm a pro tváření za studena je obsah C max. 0,22 % resp. 0,24% v hotovém výrobku.

<sup>5)</sup> je-li ocel určena k válcování za studena je obsah C max. 0,22% resp. 0,24% pro hotový výrobek.

<sup>6)</sup> průměrná hodnota vypočtená výsledků tří stanovení musí splňovat předepsané požadavky. Jedna hodnota může být nižší, než předepsaná minimální hodnota za předpokladu, že nebude nižší než 70% této hodnoty. V opačném případě se odebírají ze zkušební vzorku další 3 zkušební tělesa. Průměrná hodnota ze 6 zkoušek pak nesmí být nižší než předepsaná minimální hodnota, přičemž 2 výsledky mohou být nižší, ale pouze jeden s hodnotou nižší, než 70% předepsané minimální hodnoty.

<sup>7)</sup> pro dlouhé výrobky maximální hodnota CEV 0,54

<sup>8)</sup> pro podélný směr zkoušení

Obrázek 43 – Materiálový list oceli S355J2 [8]